



## **TEKNIikka JA LIIKENNE**

**Auto- ja kuljetustekniikka**

**Autosähkötekniikka**

## **INSINÖÖRITYÖ**

### **FORMULA STUDENT ELECTRIC**

**Työn tekijä: Jouni Ilmaniemi  
Työn ohjaajat: Pasi Oikarinen  
Työn ohjaajat: Sami Ruotsalainen**

**Työ hyväksytty: \_\_\_\_ . \_\_\_\_ . 2011**

**Pasi Oikarinen  
Tuntiopettaja**



## **ALKULAUSE**

Tämän insinöörityön aiheena on Formula Student Electric ja sen vaatimusten selvittäminen Metropolia Motorsportille. Tämä on ensimmäinen työ, joka käsittelee Formula Student Electric -sarjaa.

Haluan kiittää työn valvojia Pasi Oikarista ja Sami Ruotsalaista sekä kaikkia Metropolia Motorsportin jäseniä, jotka ovat olleet vuosien varrella suunnittelemassa ja rakentamassa tiimin historian autoja.

Erityisen kiitoksen ansaitsee Henry Ford Säätiö, jolta saamani henkilökohtainen apuraha kesälle 2009 mahdollisti täyspäiväisen työskentelyn ja testaamisen auton parissa.

Haluan myös kiittää Audi Finlandia ja Mobil 1, jotka ovat rahallisilla panostuksillaan mahdollistaneet Formula Student -projektin jatkumisen.

Helsingissä 11.1.2011

Jouni Ilmaniemi

## TIIVISTELMÄ

|  |  |
|--|--|
| <b>Työn tekijä:</b> Jouni Ilmaniemä  |  |
| <b>Työn nimi:</b> Formula Student Electric   |  |
| <b>Päivämäärä:</b> 11.1.2011   | <b>Sivumäärä:</b> 59 s. + 3 liitettä                 |
| <b>Koulutusohjelma:</b><br>Auto- ja Kuljetustekniikka  | <b>Suuntautumisvaihtoehto:</b><br>Autosähkötekniikka |
| <b>Työn ohjaaja:</b> Pasi Oikarinen  |  |
| <b>Työn ohjaaja:</b> Sami Ruotsalainen   |  |
| <p>Tässä insinööriyössä selvitetään Formula Student Electric -kilpailun asettamia vaatimuksia autolle ja kuinka ne voidaan täyttää. Työ pohjautuu Formula Student Electric -sääntöihin ja sähköautotekniikkaa käsittelevään kirjallisuuteen. Työssä myös käsitellään lyhyesti myös vuonna 2010 pidettyä ensimmäistä Formula Student Electric -kilpailua.</p> <p>Työn tarkoituksena selvittää sääntöjen vaatimuksia lähinnä sähkötekniikan osalta. Lisäksi työssä määritellään tärkeimmät tekijät jotka vaikuttavat auton suorituskykyyn ja sähköisenvetojärjestelmän mitoittamiseen sekä esitellään mitoitus esimerkkejä. Työn tavoitteena on myös koostaa sähköisenvetojärjestelmän osien toimintaperiaatteet ja avata niitä sähkötekniikkaa vähän tai ei ollenkaan tuntevalle insinööriopiskelijalle.</p> <p>Mitoittamiseen käytettiin testaustuloksia Metropolia Motorsportin vuoden 2010 ja 2009 polttomoottoriautosta. Määritellyistä tekijöistä ja saaduista tuloksista muodostettiin simulatiomallit MatLab-ohjelmalla. Näillä simulaatioilla selvitettiin moottorin ja akuston suorituskykyvaatimukset. Formula Student Electric -kilpailua työntekijä pääsi seuraamaan itse ja keskustelemaan eri tiimien kanssa autojen toteutuksesta sekä kokemuksista niiden suunnittelussa ja rakentamisessa.</p> <p>Metropolia Motorsport on tehnyt päätöksen osallistua Formula Student Electric -kilpailuihin tulevaisuudessa. Tämä työ osaltaan helpottaa auton suunnittelua. Simulatiomallit auttavat komponenttien mitoittamisessa, ja niitä voidaan tarkentaa, kun tiedetään paremmin komponenttivalinnat sekä auton lopulliset mitat.</p> |  |
| <b>Avainsanat:</b> Formula Student Electric, sähkömoottori, akku, simulointi   |  |

## ABSTRACT

|   |   |
|---|---|
| <b>Name:</b> Jouni Ilmaniemi  |   |
| <b>Title:</b> Formula Student Electric  |   |
| <b>Date:</b> 11.1.2011  | <b>Number of pages:</b> 59 pages + 3 appendixes                   |
| <b>Department:</b><br><br>Automotive and<br>Transport Engineering   | <b>Study Programme:</b><br><br>Automotive Electronics Engineering |
| <b>Instructor:</b> Pasi Oikarinen, Lecturer   |   |
| <b>Instructor:</b> Sami Ruotsalainen, Senior Lecturer   |   |
| <p>This Bachelor's thesis examines requirements for a race car set by the Formula Student Electric competition and how these requirements can be fulfilled. This thesis is based on the Formula Student Electric rules and literature of electric car technology. The thesis also describes shortly the first Formula Student Electric competition, which was held in 2010.</p> <p>The purpose of this thesis is to examine the requirements for the rules concerning electrical engineering. In addition, the thesis defines the most important factors that have an effect on the car's performance and electric traction system design. It also gives design examples. The thesis also analyses the operating principles of the components of electric traction system and explains them to an engineering student who knows some of the basic principles of electric engineering or does not know them at all.</p> <p>The design examples are based on testing results from internal combustion engine cars of Metropolia Motorsport from the years 2010 and 2009. Simulation models were built using MatLab program based on the factors defined and the results that were achieved. The writer of this thesis got an opportunity to travel on site to watch the Formula Student Electric competition and discuss solutions, design and building of cars with the teams.</p> <p>Metropolia Motorsport has made a decision to take part in the Formula Student Electric competition in the future. This thesis will probably help in the design work of the car. Simulation models help to design components and they can be improved when component options are known better and the main measurements of the car are more accurate.</p> |   |
| <b>Keywords:</b> Formula Student Electric, electric motor, accumulator, simulation  |   |

## SISÄLLYS

### ALKULAUSE

### TIIVISTELMÄ

### ABSTRACT

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| <b>1</b>   | <b>JOHDANTO</b>  | <b>1</b>  |
| <b>2</b>   | <b>SÄÄNNÖT</b>   | <b>3</b>  |
| <b>2.1</b> | <b>Tärkeät dokumentit ja tiedot</b>                        | <b>3</b>  |
| 2.1.1      | <i>Electrical Safety Form</i>                              | 3         |
| 2.1.2      | <i>Failure Modes and Effects Analysis</i>                  | 4         |
| 2.1.3      | <i>Safety Responsible(s) Certificate</i>                   | 5         |
| <b>2.2</b> | <b>Ajoneuvon vaatimukset ja rajoitukset</b>                | <b>5</b>  |
| 2.2.1      | <i>Brake System</i>  | 5         |
| 2.2.2      | <i>Chassis</i>   | 6         |
| 2.2.3      | <i>Firewall</i>  | 6         |
| 2.2.4      | <i>Brake Test</i>  | 6         |
| 2.2.5      | <i>Brake Over-Travel Switch</i>                            | 7         |
| 2.2.6      | <i>Tractive System</i>                                     | 7         |
| <b>2.3</b> | <b>Varikkosäännöt</b>                                      | <b>7</b>  |
| <b>2.4</b> | <b>Sähkö säännöt</b>                                       | <b>8</b>  |
| 2.4.1      | <i>Control and Tractive System</i>                         | 8         |
| 2.4.2      | <i>High-Voltage (HV) and Low-Voltage (LV) ja Grounding</i> | 9         |
| 2.4.3      | <i>Insulation Monitoring Device</i>                        | 9         |
| 2.4.4      | <i>No exposed tractive system connections</i>              | 10        |
| 2.4.5      | <i>Insulation, wiring and conduit</i>                      | 11        |
| 2.4.6      | <i>Tractive-system-active light</i>                        | 11        |
| 2.4.7      | <i>Master Switches</i>                                     | 12        |
| 2.4.8      | <i>Fusing</i>  | 13        |
| 2.4.9      | <i>Energy Storage</i>                                      | 13        |
| 2.4.10     | <i>Battery Management System (BMS)</i>                     | 14        |
| 2.4.11     | <i>Accumulator Insulation Relays</i>                       | 14        |
| 2.4.12     | <i>Wiring of the tractive system supply</i>                | 14        |
| 2.4.13     | <i>Energy meter</i>  | 14        |
| 2.4.14     | <i>Accumulator Container</i>                               | 15        |
| 2.4.15     | <i>High-Voltage Enclosure</i>                              | 16        |
| 2.4.16     | <i>Charging</i>  | 16        |
| 2.4.17     | <i>Accumulator Container Hand Cart</i>                     | 16        |
| <b>2.5</b> | <b>Katsastus</b>   | <b>16</b> |
| <b>2.6</b> | <b>Kilpailu</b>  | <b>17</b> |
| 2.6.1      | <i>Static Events</i>                                       | 18        |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 2.6.2 | <i>Dynamic Events</i>                         | 18 |
| 2.7   | <b>Mahdolliset sääntömuutokset</b>            | 19 |
| 3     | <b>AUTO</b>                                   | 20 |
| 3.1   | <b>Mitoitus</b>                               | 20 |
| 3.1.1 | <i>Vierintävastus</i>                         | 20 |
| 3.1.2 | <i>Ilmanvastus</i>                            | 22 |
| 3.1.3 | <i>Kiihdytysvastus</i>                        | 22 |
| 3.1.4 | <i>Voimansiirtovastus</i>                     | 24 |
| 3.1.5 | <i>Kokonaisvastus</i>                         | 24 |
| 3.1.6 | <i>Tulokset</i>                               | 24 |
| 3.1.7 | <i>Simulointi</i>                             | 26 |
| 3.2   | <b>Sähkömoottori</b>                          | 31 |
| 3.2.1 | <i>Harjallinen tasavirtasähkömoottori</i>     | 32 |
| 3.2.2 | <i>Harjaton tasavirtasähkömoottori</i>        | 34 |
| 3.2.3 | <i>Reluktanssimoottori</i>                    | 36 |
| 3.2.4 | <i>Induktiomoottori</i>                       | 37 |
| 3.2.5 | <i>Soveltuvuus</i>                            | 38 |
| 3.3   | <b>Akut</b>                                   | 38 |
| 3.3.1 | <i>Lyijyakku</i>                              | 40 |
| 3.3.2 | <i>Nikkelimetallihybridiakku</i>              | 40 |
| 3.3.3 | <i>Litium-akut</i>                            | 41 |
| 3.3.4 | <i>Kondensaattori</i>                         | 42 |
| 3.3.5 | <i>Akkujen valmistajat</i>                    | 43 |
| 3.3.6 | <i>Akkupaketti</i>                            | 44 |
| 3.4   | <b>Moottorinohjainlaite</b>                   | 45 |
| 3.4.1 | <i>Pulssinleveysmodulaatio-ohjaus</i>         | 46 |
| 3.4.2 | <i>Invertteri</i>                             | 46 |
| 3.4.3 | <i>Ohjausjärjestelmä</i>                      | 48 |
| 3.5   | <b>Kokonaisuus</b>                            | 49 |
| 3.5.1 | <i>Yksimoottorinen takavetoinen auto</i>      | 49 |
| 3.5.2 | <i>Kaksimoottorinen takavetoinen auto</i>     | 50 |
| 3.5.3 | <i>Neliveto</i>                               | 50 |
| 3.5.4 | <i>Moottorien sijoittelu</i>                  | 51 |
| 3.5.5 | <i>Akkujen sijoittelu</i>                     | 51 |
| 3.5.6 | <i>Matalajännitejärjestelmä</i>               | 52 |
| 4     | <b>2010 FORMULA STUDENT ELECTRIC KILPAILU</b> | 53 |
| 4.1   | <b>Tiimit</b>                                 | 54 |
| 4.1.1 | <i>E40 Eindhoven</i>                          | 54 |
| 4.1.2 | <i>E33 Zürich</i>                             | 54 |
| 4.1.3 | <i>E26 Stuttgart</i>                          | 54 |
| 4.1.4 | <i>E62 Zwickau</i>                            | 55 |
| 4.2   | <b>Tulokset</b>                               | 55 |
| 5     | <b>YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT</b>                | 57 |
|       | <b>VIITELUETTELO</b>                          | 59 |

## 1 JOHDANTO

Formula SAE (FSAE) on insinööriopiskelijoille suunnattu kilpailu, joka sai alkunsa vuonna 1981 Yhdysvalloissa SAE:n (Society of Automotive Engineers) järjestämänä. Tarkoituksena oli luoda rekrytointikanava teollisuudelle ja antaa nuorille insinööriopiskelijoille mahdollisuus näyttää taitonsa sekä osaamisensa formulatyylisen kilpa-auton toteuttamisessa. Vuosituhannen vaihteessa kilpailuita alettiin järjestämään myös Pohjois-Amerikan ulkopuolella, joista maineikkaampia ovat Formula Student (FS) Englannissa ja Formula Student Germany (FSG) Saksassa. Tällä hetkellä maailmassa on noin 450 tiimiä eri korkeakouluista ja yliopistoista. Kilpailuja ja siihen osallistuvia autoja kutsutaan yleisesti Formula Studentiksi.

Formula Student Electric (FSE) -kilpailu julkaistiin vuonna 2009 FSG:ssä. Ensimmäinen kilpailu pidettiin vuonna 2010 FSG:n yhteydessä, perinteisiä polttomoottorikäyttöisiä autoja kutsuttiin Formula Student Combustioniksi (FSC). Idea on sama kuin Formula Studentissa, mutta polttomoottorin ja polttoaineen sijasta käytetään sähkömoottoria ja akkuja. Kilpailu tarjoaa ainutlaatuisen mahdollisuuden insinööriopiskelijoille koettaa taitojaan sähköautotekniikassa, samalla tavalla kuin perinteisessä FSC-kilpailussa polttomoottoriautotekniikassa. Vaikka varsinaista rinnan ajoa ei kilpailussa nähdä, on kilpailu kovaa ja tiimit hakevat menestystä auton suunnittelulla ja testaamisella jotta se saataisiin kulkemaan nopeammin kuin muiden tiimien autot.

Metropolia Ammattikorkeakoulu (aik. Helsingin ammattikorkeakoulu Stadia) on ollut mukana FS-kilpailussa opiskelijoistaan koostuvalla tiimillään jo vuodesta 2002 alkaen. Entinen Stadia Motorsport nykyinen Metropolia Motorsport on suunnitellut ja rakentanut perustamistaan lähtien joka vuosi uuden auton, jolla on menestyksekkäästi kilpailtu maailmalla. FSE on herättänyt kiinnostusta monissa FS-tiimeissä mukaan lukien Metropolia Motorsportin, jossa harkitaan FSE-auton rakentamista. Tämä insinööriyön tavoite on antaa tukea tuohon harkintaan ja perustietoja mahdollisen FSE-auton suunnitteluun.

Tämän työn tavoitteisiin pyritään tarkastelemalla FSE-sääntöjä, sähköistä vetojärjestelmää sekä hieman sen toteutusta FS-tyyppisessä autossa. Työssä selvitetään mitä vaatimuksia ja suoritusarvoja autolta odotetaan sään-

nöissä ja kuinka ne saavutetaan. Tavoitteena on myös avata sähköautoissa käytettyä tekniikkaa myös niille, jotka ovat keskittyneet mekaaniseen suunnitteluun. Työssä myös tarkastellaan vuoden 2010 FSE-kilpailua ja sen osanottajia sekä analysoidaan tuloksia. Tämä työ on suunnattu Metropolia Motorsportin jäsenille ja lukijalta odotetaan jonkinasteista tuntemusta FS-kilpailusta ja autoista.



## 2 SÄÄNNÖT

Yleisesti käytetään FSAE -sääntöjä, tosin FSG on tehnyt niihin joitain lisäyksiä parantaakseen turvallisuutta ja koska FSG on vasta 2011 virallinen FSAE -kilpailu kuten FS:ssä. Vuoden 2010 FSE:n säännöt pohjautuvat FSG:n sääntöihin siten, että vain tarvittavat muutokset on kerrottu sääntökirjassa. Esimerkiksi jousitusta ja alustaa koskevat säännöt ovat samat kuin FSG:ssä jolloin niitä ei ole mainittu, mutta voimalinjan säännöt ovat täysin erilaiset, joten ne korvaavat FSG:n säännöt niiltä osin. Tässä työssä käytetään vuoden 2010 FSE -sääntöjen versioita 1.5.0 [1] ja ne muuttuvat vuosittain kuten FSAE -säännötkin. Merkittävimmät muutokset ja lisäykset julkaistaan kerran vuodessa, ennen marraskuun 30. päivää, pienempiä muutoksia voidaan lisätä milloin vain ja niistä ilmoitetaan kilpailun internetsivuilla [1, s. 10]. FSE:n sääntöjen eroavaisuudet FSG:n sääntöihin käydään läpi pääpiirteittäin kiinnittäen huomiota etenkin sähkötekniisiä ratkaisuja käsitteleviin sääntöihin.

### 2.1 Tärkeät dokumentit ja tiedot

Formula Student -kilpailuihin lähetään etukäteen erilaisia dokumentteja ja tietoja tiimistä, sen jäsenistä ja autosta. Jokaiselle näistä on asetettu oma päivämääränsä, mihin mennessä kyseisten dokumenttien ja tietojen pitää olla toimitettuna kilpailun järjestäjille. Myöhästymisestä saa miinuspisteitä, tai jos ne puuttuvat kokonaan, evätään tiimiltä kilpailuun osallistuminen. Päivämäärät on ilmoitettu säännöissä kohdassa 1 Important Dates, ja ne vaihtelevat hieman vuosittain. Järjestäjien taakan helpottamiseksi ja mahdollisen korjausten takia on pyrittävä lähettämään nämä dokumentit niin aikaisin kuin mahdollista. Tässä osiossa kerrotaan vain FSE:n lisäyksistä ja muutoksista verrattuna FSG:hen

#### 2.1.1 *Electrical Safety Form*

FSE:hen täytyy lähettää sähköturvallisuuslomake, Electrical Safety Form (ESF), josta täytyy selkeästi käydä ilmi auton koko sähköjärjestelmä [1, s. 17]. ESF:n täytyy havainnollistaa kaikkien sähköisten komponenttien väliset yhteydet, jännitetasot, kytkentäkaavio, johdotus autossa sekä akkujen ja varaajien kiinnitys ja rakenne. Sähköjärjestelmän jokaiselle osalle on laskelmilla osoitettava maksimi- ja keskiarvot virroille ja jännitteille. Kaikista vetojär-

jestelmien osista, mukaan lukien johdinkomponentit, täytyy esittää datalehti jossa on määritellyt arvot, ja on osoitettava, ettei mitkään näistä arvoista ylitä. Sähköisten arvojen lisäksi tämä käsittää ympäristön aiheuttaman rasituksen, esimerkiksi lämpötilat ja värinän.

On suositeltavaa käyttää CAD- tai valokuvia erilaisten kokoonpanojen ja itse tehtyjen osien paremman ymmärrettävyyden vuoksi. Dokumentti pitää palauttaa PDF-muodossa. Pienin sallittu fonttikoko on 11 ja käytettävä fontti Arial. On myös kiinnitettävä huomiota dokumentin sisällysluetteloon ja sisäisiin linkkeihin, jotta saadaan helposti luettava ja selkeä lopputulos. Datalehdet on kokonaisuudessaan lisättävänä liitteinä dokumentin loppuun, mutta osia niistä voidaan käyttää tekstissä jos tarpeen. Dokumentista on käytävä ilmi kontaktihenkilön nimi ja sähköpostiosoite mahdollisten ESF:ä koskevien kysymysten varalta. ESF on design-tuomareiden saatavilla, ja he voivat ottaa sen huomioon arvostelussa, joten ESF kannattaa tehdä mahdollisimman hyvin ja huolellisesti. Näin tulee dokumentoitua sähköjärjestelmät hyvin tulevaisuuden kehitystä silmällä pitäen, ja ESF helpottaa sähköjärjestelmien esittelyä design-osiossa.

### 2.1.2 *Failure Modes and Effects Analysis*

Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) eli vapaasti käännettynä Vikamoodien ja vaikutusten analyysi [1, s. 17]. Tämä on Excel-taulukko, jonka pohja on saatavissa järjestäjiltä kilpailun internetsivuilta. Taulukossa on valmiina 17 kohtaa, jotka vähintään pitää täyttää. Nämä 17 eivät välttämättä täysin kata kilpailuun ilmoitettavaa autoa, joten tarvittaessa kohtia voi lisätä, mutta asetelmaa ja taulukkoa ei muuten saa muokata. Alussa on kaksi esimerkkitäyttöä, jotka voidaan korvata autoon sopivaksi. Kuten ESF FMEA on designtuomareiden nähtävissä, ja he ottavat sen huomioon arvostelussa, joten se on täytettävä mahdollisimman huolellisesti. Hyvin tehty FMEA toimii myös mainiona apuna vianhaussa, jos siihen on tarvetta. Kuvat, kuvaajat ja datalehdet, joita halutaan käyttää FMEA:n tukena, lisätään ESF:n liitteisiin ja niihin viitataan FMEA:sta.

Kullekin vialle on yhdeksän saraketta. Component/Item tarkoittaa komponenttia tai osaa, jossa vika voi ilmetä. Functio-kohdassa kerrotaan kyseisen komponentin toiminta tai tarkoitus. Failure Mode- eli vikamoodisarakkeessa kerrotaan lyhyesti komponenttiin vaikuttava vika. Huomioitavaa on, että yhdellä komponentilla voi olla useampia vikoja ja jokainen vika täytyy täyttää

erikseen omaan kohtaansa. Failure Cause -kohtaan tulee vian syy, miten mainittu vika voi syntyä. Vian vaikutuksille (Failure Effect) on kaksi kohtaa lokaali (Local) ja globaali (Global). Lokaalilla tarkoitetaan vaikutuksia ja vaaroja, joita vialla on käyttäjään eli kuljettajaan, ja globaalilla puolestaan tarkoitetaan samoja, mutta auton ulkopuolella olevia henkilöitä koskevia vaaroja. Failure Detection -sarakeeseen ilmoitetaan vian havaintotapa. Failure Handling -kohtaan täytetään vian käsittely tai korjaustapa. Lopuksi on vielä kommenttisarake, jonne voi lisätä vaikka viittauksia kuviin ja taulukoihin.

### 2.1.3 *Safety Responsible(s) Certificate*

Tiimin on osoitettava kilpailuun yksi tai useampi turvallisuusvastaava [1, s. 10]. Turvallisuusvastaava vastaa auton kaikista sähköisistä toiminnoista kisan aikana. Hän on myös vastuussa kaikenlaisesta työskentelystä auton parissa kilpailun aikana ja on ainut henkilö tiimistä, joka voi ilmoittaa auton sähköisesti turvallisiksi, jotta muu tiimi voi työskennellä auton minkä tahansa järjestelmän kanssa. SR:n on oltava tavoitettavissa koko kilpailun ajan. SR ei voi olla kuljettaja, ellei toista SR:ää ole nimetty, joka ei ole kuljettaja. SR:llä täytyy olla korkeakoulututkinto sähkötekniikasta sekä lisenssi tai lupa työskennellä korkeajännitteisten järjestelmien kanssa ajoneuvoissa. Tämä lisenssi tai lupa täytyy ladata kisan nettisivuille useampisivuisena PDF:nä.

FSE:n internetsivuilla ilmoitettiin 6. huhtikuuta, ettei lisenssiä tai lupaa työskennellä korkeajännitteisten järjestelmien kanssa ajoneuvoissa enää vaadita mutta sitä silti suositellaan.

## 2.2 **Ajoneuvon vaatimukset ja rajoitukset**

FSE:ssä noudatetaan pitkälti FSAE:n sääntöjä auton vaatimuksien ja rajoitusten puolesta. Koska tarkoitus on rakentaa sähkökäyttöinen polttoainekäyttöisen sijasta, on joitain sääntökohtia korvattu tai muutettu sopimaan paremmin FSE-kilpailuun.

### 2.2.1 *Brake System*

Jarrutusenergian talteenotto on sallittu. Tämän pitää tapahtua jarrupolkimen liikkeen ensimmäisellä puoliskolla (50 %) ja vain, kun kuljettaja painaa jarrupoljinta. Loppupuoliskon pitää liikuttaa pääsylinteriä tai sylintereitä. Jarruväli on syyttävä aina, kun jarrupoljinta painetaan [1, s. 11]. Tämän vuoksi

jarruenergian talteenoton toteuttaminen on haastavaa, jos halutaan pitää hyvä ja jämäkkä poljintuntuma.

### 2.2.2 Chassis

Perinteisessä Formula Studentissa pitää joka vuodelle rakentaa uusi runko. FSE:ssä vuonna 2010 voidaan käyttää olemassa olevaa runkoa, kunhan se täyttää ainakin vuoden 2007 FSAE:n säännöt. Tämän lisäksi vuoden 2010 FSAE:n sääntöjen kohdan B3.2 määrittelemän päärakenteita ei saa muuttaa rungosta [2, s. 17]. Putkirungon putkiin jotka eivät kuulu pää- ja etukaareen, sivutörmäysputkiin, etubulkheadiin ja sen tukiin, saa tehdä muutoksia jotta runko olisi FSE:n sääntöjen 6.19 mukainen. Olemasta olevasta rungosta on lähetettävä kaksi Structural Equivalency Form:ia (SEF), senvuotinen, jolloin runkoa on käytetty kilpailussa, ja uusi. Törmäysvaimentimen vaatimukset eivät muutu käytettäessä vanhaa runkoa, minkä vuoksi törmäysvaimentimen on täytettävä vuoden 2010 FSAE-säännöt sekä FSG- ja FSE-lisäykset.

Putkirunkoa tuskin kannattaa käyttää uudelleen, vaikka siihen on mahdollisuus. Vanha runko rajoittaisi auton suunnittelua liikaa. Putkirunko on edullinen ja helppo rakentaa, sekä siitä on paljon kokemusta, joten sellainen kannattaa suunnitella ja valmistaa uusi ja sopiva FSE-autolle. Monokokkirungon kohdalla kannattaa harkita uudelleenkäyttöä, mutta sekin tuo rajoituksia auton suunnittelun.

### 2.2.3 Firewall

Tulipellin tai tuliseinän on erotettava ohjaamo kaikista vetojärjestelmän komponenteista ja mahdollisista nestejäähdytys- sekä voitelujärjestelmistä. Jos halutaan käyttää muuta kuin metallista tuliseinää, on vetojärjestelmän puolella päällystetty metallipintaisella lämpösuojalla. Metalliset pinnat täytyy yhdistää matalaresistanssisella kytkennällä kontrollijärjestelmän maahan. Kuljettajan puoleisen pinnan pitää olla valmistettu sähköä eristävästä materiaalista, joka on mitoitettu eristämään vähintään auton suurimmat käytettävät jännitteet.

### 2.2.4 Brake Test

Jarrutestissä auton pitää kiihdyttää lyhyt matka, minkä jälkeen kuljettaja kytkee vetojärjestelmän pois päältä ja painaa jarrupoljinta niin pitkälle kuin mahdollista. Testi on läpäisty, jos kaikki neljä pyörää lukkiutuvat.

### 2.2.5 *Brake Over-Travel Switch*

Perinteisessä Formula Studentissa tappokytkimen eli kytkimen, joka on sijoitettu niin että jarrupolkimen liikkuaessa syvemmälle kuin sen on normaalitilanteessa tarkoitus, se katkaisee moottorilta sytytyksen ja sammuttaa polttoainepumput. FSE:ssä tämän kytkimen täytyy sammuttaa vetojärjestelmä avaamalla akkujen eristysrele [1, s. 13].

### 2.2.6 *Tractive System*

Tractive System eli vetojärjestelmää koskevat säännöt korvaavat perinteisen Formula Studentin polttomoottoria koskevat säännöt. Jos käytetään nestejäähdytysjärjestelmää, on noudatettava FSAE:n sääntöjä näiltä osin. Myös FSAE:n sääntöjen kohtaa B 11.4 akkujen asentamisesta on noudatettava [2, s. 45].

Moottoreina sallitaan vain sähkömoottorit. Sähkömoottori saa olla minkä tyyppinen tahansa, ja niitä saa olla kuinka monta tahansa. Hybridijärjestelmät ovat kiellettyjä.

Sähköinen kaasupoljin on sallittu. Kaasupolkimen täytyy palata alkuperäiseen asentoonsa, kun sitä ei paineta. Kaasupolkimen asentoanturia voi käyttää vain kaasupolkimella. Polkimessa pitää vähintäänkin olla kaksi erillistä anturia, kumpikin omilla erillisillä käyttöjännite- ja maajohdoilla. Toisen tai useampien anturien tarkoitus on varmistaa toiminta vikatilanteessa, jos yksi niistä vikaantuu.

## 2.3 **Varikkosäännöt**

Varikkosäännöt määrittelevät auton liikuttamisen varikolla sekä auton lisävarusteet kuten palosammuttimet [1, s. 15].

Auton pitää olla työnnettävissä ja liikuteltavissa, kun kaikki sähköjärjestelmät on kytketty pois päältä.

Työntötangon pitää olla erillinen irrotettava väline, jolla auto pääsääntöisesti liikutetaan varikolla. Työntötangon pitää olla työnnettäessä auton taka-akselin takana. Ainakin yhden palosammuttimen pitää olla kiinnitettynä työntötankoon pikakiinnityksellä ja helposti saatavilla.

Vetojärjestelmän päälle kytkeminen on kielletty varikkoalueella. Jos on tarvetta kytkeä vetojärjestelmään virrat, on tähän tarkoitukseen omat valvotut alueensa, jolla se on sallittua. Niillä saa myös pyörittää moottoreita, mutta vain kilpailun aktiivisina tunteina.

Jokaisen tiimillä on oltava pikatunkki, jolla auton vetävät pyörät nostetaan sääntöjen vaatimasta tunkkauspisteestä vähintäänkin 10,2 cm:n korkeuteen. Tämä on yksi tarkastuskohteista katsastuksessa.

Tiimillä pitää olla vähintäänkin kaksi 0,9 kg:n palosammutinta, joista toinen kulkee aina auton mukana työntötangossa. Palosammuttimet saavat olla jauhe- tai hiilidioksidisammuttimia, vaahtosammuttimet ovat kiellettyjä.

## **2.4 Sähkötekniset säännöt**

Koska auto kulkee vain ja ainoastaan sähköön voimalla, on sähköisten komponenttien ja järjestelmien käyttö määritelty tavallista tarkemmin säännöissä [1, s. 17]. Säännöissä määritellään muun muassa sallitut jännitetasot, vaaditut turvalaitteet, akkujen ja akkukoteloiden vaatimukset. ESF ja FMEA ovat tämän osion ensimmäiset pykälät, jotka käytiin läpi tärkeissä dokumenteissa.

### **2.4.1 Control and Tractive System**

Tractive System eli vetojärjestelmää ovat kaikki osat, jotka on sähköisesti yhdistetty moottoriin tai moottoreihin järjestelmästä katsottuna. Control system eli ohjausjärjestelmään kuuluvat kaikki sellaiset sähköiset osat, jotka eivät ole vetojärjestelmän osia. Vetojärjestelmä täytyy eristää kokonaan rungosta ja muista auton sähköä johtavista osista. Ohjausjärjestelmän täytyy olla matalajännitejärjestelmä, ja se pitää maadoittaa runkoon. Molemmat järjestelmät on galvaanisesti erotettava toisistaan mikä toimii myös rajana järjestelmien välissä esimerkiksi piirilevyllä. Tämän vuoksi jotkin komponentit voivat olla osana kummassakin järjestelmässä. Ohjausjärjestelmän täytyy ohjata akkujen virtaa moottoreille, ja vetävien akkujen kytkeminen suoraan moottoriin tai moottoreille on kielletty. Ohjausjärjestelmän on käynnistytävä kunnolla, ennen kuin on mahdollista kytkeä vetojärjestelmä päälle. Vikatilanteessa, jossa ohjausjärjestelmä sammuu tai se muuten sammutetaan, on myös vetojärjestelmän sammuttava.

### 2.4.2 *High-Voltage (HV) and Low-Voltage (LV) ja Grounding*

Matalajännitteeksi lasketaan jännitteet alle 60 voltia tasavirtaa ja 25 voltia tehollisarvoa vaihtovirtaa. Korkeajännite on kaikki matalajännitettä suuremmat jännitteet. Suurin sallittu nimellisjännite minkään kahden sähköisesti toisiinsa kytketyn pisteen välillä saa enintään olla 600 voltia tasa- ja vaihtovirtaa. Kaikista itse kehitetyistä sähkölaitteista täytyy olla tarkat dokumentoinnit. Matalajännite akkua saa ladata korkeajänniteakulla.

Matala- ja korkeajännitejärjestelmät pitää erottaa toisistaan. Samaan kaapelikanavaan ja/tai sukkaan ei saa laittaa sekä korkea- että matalajännitekaapelia. Jos matala- ja korkeajänniteosat jakavat saman koteloinnin on ne eristettävä toisistaan sähköjohtamattomalla materiaalilla.

Jos piirilevyllä on sekä korkea- että matalajännite, on jätettävä riittävästi tilaa näiden välille ja galvaanisesti erotettava ne toisistaan, myös eri jännitealueet on merkittävä selkeästi piirilevyille. Kaikkiin itse suunniteltuihin piirilevyihin on oltava helppo pääsy katsastuksen aikana.

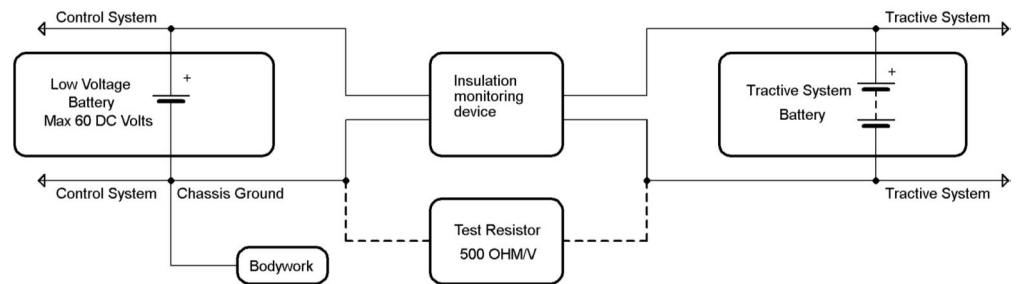
Kaikki auton sähköä johtavien osien täytyy olla matalaresistanssisessa yhteydessä ohjausjärjestelmän maapotentiaaliin.

### 2.4.3 *Insulation Monitoring Device (IMD)*

Maavuotoilmaisimen tarkoitus on valvoa eristyshäiriöitä vetojärjestelmän ja rungon välillä. Eristyksen pettäessä IMD:n on katkaistava akkujen eristysreleiden jännite sammuttaakseen vetojärjestelmän. IMD:n tila pitää näyttää kuljettajalle punaisella merkkivalolla, jonka pitää olla nähtävissä jopa kirkkaassa auringonpaisteessa. Tähän tarkoitukseen on siis hyvä valita kirkkain mahdollinen ledi osoittamaan suoraan kuljettajan silmiin. Valon täytyy palaa kun IMD havaitsee eristyksen pettäneen tai havaitsee omassa toiminnassaan vikaa. Valo täytyy merkitä selkeästi kirjaimin IMD.

IMD testataan sähkökatsastuksessa kytkemällä vastus vetojärjestelmän ja auton sähköä johtavien osien välille kuvan 1 Kuva 1 mukaisesti, toisin sanoen auton maapotentiaaliin, kun vetojärjestelmä on päällä. Vastuksen koko määritellään vetojärjestelmä maksimijännitteen mukaan, niin että jokaista voltia kohden on 500 ohmia eli 500 ohm/V. Testi on läpäisty hyväksyttävästi kun IMD sulkee vetojärjestelmän virran aina, kun vetojärjestelmä yhdistetään testausvastuksella auton maapotentiaaliin. Tämä testi voidaan toistaa milloin

vain kilpailun aikana, jos se katsotaan tarpeelliseksi. Testin jälkeen vetojärjestelmä kriittiset osat sinetöidään jos sinetit murretaan, on testi suoritettava uudestaan, jotta autolla saa osallistua dynaamisiin osioihin.



Kuva 1. IMD-testin esimerkkikytkentä [1, s. 19]

IMD-testin jälkeen tiimi voi yrittää läpäistä sadetestin, joka täytyy läpäistä jos autolla halutaan ajaa kostealla tai märällä radalla. Testin aikana vetojärjestelmän pitää olla aktivoituna ja yksikään vetävistä pyöristä ei saa koskettaa maata eikä kuljettaja saa istua autossa. Vettä suihkutetaan autoa kohti jokaisesta mahdollisesta suunnasta 120 sekunnin ajan. Vesisuihku on saateenomaista, ei painepesurilla pesemistä. Testi on läpäisty, jos IMD ei reagoi testin aikana. Tämä testi on uusittava, jos vetojärjestelmän sinetit on murrettu ja IMD-testi on suoritettu uudestaan. Säännöissä suositellaan käyttämään vähintään IP67-tasoista suojausta sähköisille komponenteille ja liitoksille.

IMD:ksi on määritelty Bender A-ISOMETER iso-F1 IR155, IR486, IR475LY3 tai vastaava FSE:n hyväksymä laite. Helpointa on hankkia yksi edellä listatuista laitteista. Jos aikoo hankkia jonkin muun laitteen, on varmistettava hyvissä ajoin etukäteen FSE:ltä, saako sitä käyttää. Oma vastaava tuskin edes kannattaa harkita tekevänsä mahdollisten testausten ja sertifiointien takia.

#### 2.4.4 No exposed tractive system connections

Vetojärjestelmä kaikki osat pitää eristää niin, ettei jännitteellisiin osiin pysty koskettamaan edes pienelläkään työkalulla. Näistä ainoana poikkeuksena on kaksi mittauspistettä, joista toinen on yhteydessä moottorinohjaimen positiiviseen ja toinen negatiiviseen syöttölinjaan enintään 0,35 mm<sup>2</sup>:n johdoilla. Näiden pisteiden pitää olla pyöreitä, vähintään 6 mm halkaisijaltaan ja valmistettu sähköä johtavasta materiaalista. Pisteisiin pitää päästä helposti käsiksi irrottamatta katteita, mutta ne pitää koteloida ja kotelon suojan tai kannen pitää olla helposti irrotettavissa. Mittauspisteistä on tarkoitus tarkistaa



että vetojärjestelmä kytkeytyy pois päältä kunnolla määrätyssä ajassa sähkökatsastuksesta. Näitä pisteitä voidaan myös käyttää myös varmistamaan auton turvallinen käsittely mahdollisten pelastusoperaatioiden aikana.

#### 2.4.5 *Insulation, wiring and conduit*

Eristämiseen saa käyttää vain materiaalia, joka kestää oletetut ympäristölämpötilat. Kaikki johdot ja liitännät vetojärjestelmässä on mitoitettava riittävän kokoisiksi. Johtoihin on merkittävä johdon koko, suurin käyttölämpötila ja eristysjännite, tai vaihtoehtoisesti johdossa on koodi, joka selvästi viittaa datalehteen, josta edellä mainitut ominaisuudet löytyvät. Kaikkien johtimien ja eristeiden datalehdet, joista käy ilmi käytettyjen materiaalien tiedot, täytyy tuoda sähkökatsastukseen. Valmiin vetojärjestelmän johtosarjan täytyy olla ammattimaisesti valmistettu, ja se pitää varmistaa löystymisen sekä mekaanisen rasituksen varalta. Kyseinen johtosarja on sekä suunniteltava että valmistettava niin, ettei se rikkoudu tai vahingoitu auton normaalikäytössä.

Kaikki korkeajännitejohdot, joita ei ole erikseen koteloitu tai suojattu, on sijoitettava kulkemaan oranssissa sähköä johtamattomassa kaapelikourussa, joka on turvallisesti kiinnitetty. Mikään johto ei saa olla alempana kuin auton runko. Vetojärjestelmän johdot on suojattava pyöriviltä ja liikkuvilta osilta niissä kohdin, missä tarpeellista kuten mahdollisten rattaiden ja ketjujen lähellä. Säännöissä suositellaan käyttämään suojattua johtoja kaikkialla vetojärjestelmässä. Käytettäessä ulkoisia jäähdytysripoja ne on maadoitettava kunnollisesti.

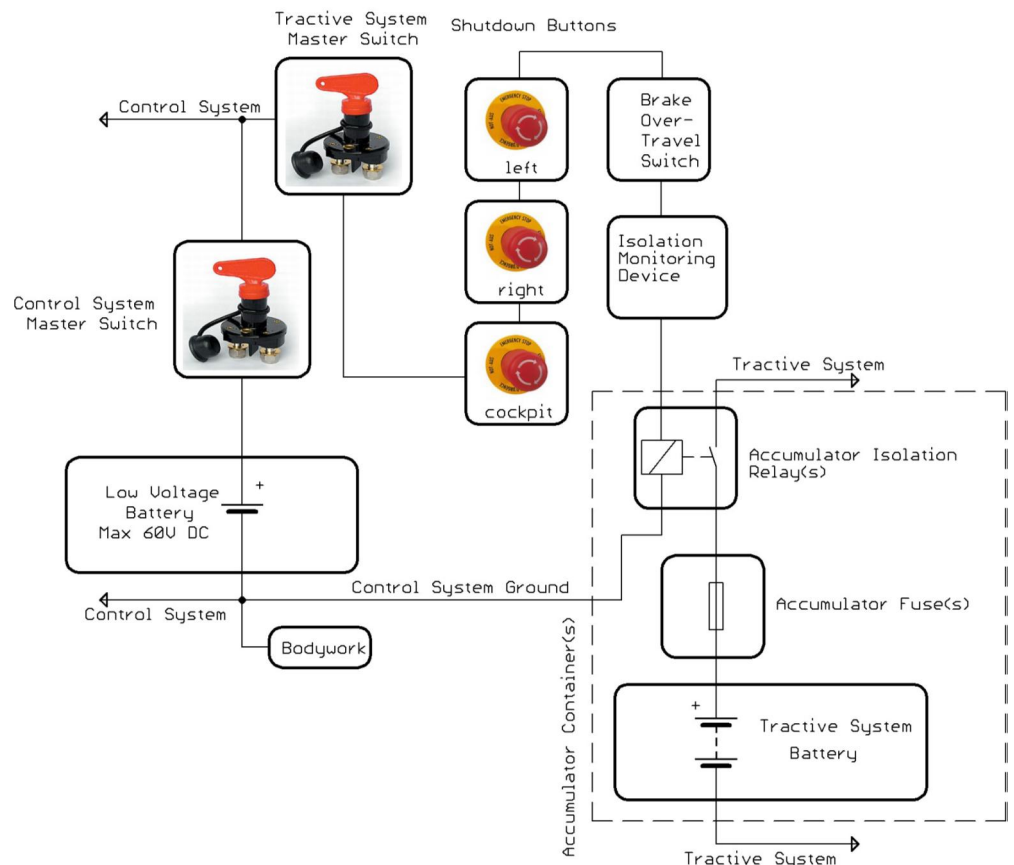
#### 2.4.6 *Tractive-system-active light*

Vetojärjestelmän päällä olemisen pitää näkyä selvästi eli milloin auto on valmis ajettavaksi, vetojärjestelmän katsotaan olevan päällä aina, kun akkukoteloiden eristysreleet on suljettu tai jännite akkukoteloiden ulkopuolella on yli 60 voltia tasajännitettä tai 25 voltia vaihtojännitettä. Tätä varten auton pääkaaren korkeimmassa kohdassa on oltava merkkivalo, joka näkyy vaakatasossa joka suuntaan jopa kirkkaassa auringonpaisteessa. Tämä valon on oltava aina päällä, kun vetojärjestelmä on päällä, ja kun vetojärjestelmä ei ole päällä, pitää valon olla sammunut.

#### 2.4.7 Master Switches

Autossa täytyy olla kolme hätäseisnappia, joista yhdenkin painaminen katkaisee akkukoteloiden eristysreleiden pitovirran ja näin katkaisee korkeajännitteen vetojärjestelmältä. Yhtäkin nappia painettaessa on vetojärjestelmässä jännitteen laskettava alle korkeajännitetason viidessä sekunnissa. Nappien pitää olla paina-kierrä- tai paina-vedä-tyyppisiä hätäseisnappeja. Kahdeni näistä napeista pitää sijaita auton sivuilla kuljettajan takana pään korkeudella. Yhden pitää olla ohjaamossa kuljettajan virtakytkimenä, jolloin kuljettajan pitää ylettyä painamaan sitä riippumatta ratin asennosta.

Ohjausjärjestelmän kytkin on samalla koko auton pääkytkin, jonka tulee sijaita auton vasemmalla puolella kuljettajan takana. Vetojärjestelmän pääkytkimen tulee sijaita ohjausjärjestelmän pääkytkimen läheisyydessä. Vetojärjestelmän pääkytkimen pitää katkaista akkukoteloiden eristysreleiden pitovirta, ja kytkimen kahvan pitää olla irrotettavissa. Kummankin pääkytkimen asennot pitää merkitä selkeästi ja päällä-asennossa kytkinten pitää olla vaakatasossa. Painamalla tai kääntämällä yhtäkin edellä mainituista kytkimistä tai jarrupolkimentappokykintä pois päältä asentoon tai IMD:n aktivoitumisen pitää katkaista akkukoteloiden kaikkien eristysreleiden pitojännite ja jännitteen pitää laskea alle korkeajännitetason vetojärjestelmässä viidessä sekunnissa. Kuvasta 2 käy ilmi, kuinka kytkimet pitää kytkeä. Eristysreleiden ohjausvirtapiiriin voidaan lisätä muitakin kytkimiä sarjaan pakollisten lisäksi, jos halutaan jotenkin muuten ohjata eristysreleitä.



Kuva 2. Pääkytkimien kytkentä [1, s. 21]

#### 2.4.8 Fusing

Vetojärjestelmä pitää suojata riittävillä sulakkeilla, ja ohjausjärjestelmän suojaaminen sulakkeilla on suositeltavaa. Kaikki vetojärjestelmän johdot pitää suojata sulakkeilla, niin että sulakkeen arvo on pienempi kuin käytetyn johdon suurimman jatkuvan virrankesto.

#### 2.4.9 Energy Storage

Lukuun ottamatta suola-, lämpöakkuja ja polttokennoja kaikenlaisia akkuja, pattereita ja varaajia saa käyttää superkondensaattoreista nappiparistoihin. Käytetyistä akuista täytyy liittää datalehdet ESF:iin.

Käytetyt akkupaketit täytyy sulkea akkukoteloon tai koteloihin, joissa ne pitää kiinnittää kunnollisesti, niin etteivät ne pääse löystymään missään vaiheessa. Akkupakettien navat täytyy eristää akkukotelon sisäseinistä, jos akkukotelo on tehty sähköjohtavasta materiaalista. Jokaisessa akkukotelossa täytyy olla vähintään yksi sulake ja yksi eristysrele kuvan 2 mukaisesti.

Jokaisessa akkukotelossa täytyy olla selkeä ja näkyvä ilmaisin, esimerkiksi merkkivalo, joka palaa, kun ulommissa liittimissä on yli 60 voltin jännite. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää analogista jännitemittaria, joka selvästi luettavissa akkukotelon ulkopuolelta. Jos useampaa erillistä akkustoa käytetään varaosana, täytyy niiden olla samankokoisia, -painoisia ja -tyyppisiä kuin autossa käytetään ja ne täytyy näyttää sähkökatsastuksessa.

#### *2.4.10 Battery Management System (BMS)*

Jokaisella akustolla täytyy olla akkujenhallintajärjestelmä tai jännitteenvaakaaja, joka valvoo kennojen jännitteitä ja pitää ne datalehtien määrittelemissä rajoissa. BMS:n täytyy myös mitata akuston kriittisistä pisteistä lämpötilaa ja tarvittaessa estää kennojen ylikuumentuminen. BMS:n täytyy olla aina aktiivinen, kun akkuja ladataan. Säännöissä suositellaan, että BMS olisi myös aktiivinen, kun akuista otetaan virtaa eli puretaan.

#### *2.4.11 Accumulator Insulation Relays (AIR)*

Jokaisessa akkukotelossa täytyy olla vähintään yksi eristysrele. On suositeltavaa mitoittaa releen kytkin virran mukaan. Jos eristysrele on auki, ei korkeajännitettä saa esiintyä akkukotelon ulkopuolella ja releiden pitää virrattomana olla auki. Releen korkeimman poiskytkentävirran täytyy olla suurempi kuin akkukotelon sulakkeen virrankesto. Eristysreleen täytyy katkaista akuston kummatkin navat. Eristysreleet täytyy kytkeä niin, että ne ovat virrattomat aina, kun akkukotelo ei ole liitetty vetojärjestelmään tai latauslaitteeseen.

#### *2.4.12 Wiring of the tractive system supply*

Kaikkien syöttöjohtojen ja virran akkukoteloilta vetojärjestelmälle täytyy kulkea yhden pisteen kautta, johon kilpailun aikana kytketään energiamittari mittaamaan auton energiankulutusta.

#### *2.4.13 Energy meter*

Energiamittarin saa kilpailunjärjestäjiltä, ja se on asennettava autoon kilpailun ajaksi mittaamaan vetojärjestelmän käyttämä energia akuilta. Energiamittarin tyyppi, koko ja liittimet ilmoitetaan kilpailun nettisivuilla. Energiamittari sinetöidään ennen dynaamisia osioita, ja jos sinetti rikotaan, auto hylätään energiankulutusosiossa automaattisesti. Järjestäjät keräävät tiedot talteen dynaamistenosioiden jälkeen. Näitä energiankulutustietoja pääsee katsomaan oman autonsa kohdalta, kunhan pyytää niitä järjestäjiltä.

#### 2.4.14 Accumulator Container

Kaikkien akkukoteloiden täytyy olla tukevasti ja vahvasti kiinnitettynä runkoon, jotta ne eivät pääse löystymään tai irtoamaan dynaamisissa osioissa tai mahdollisissa onnettomuuksissa. Koteloiden pitää olla pääkaaren päältä renkaiden ulkoreunaan vedettyjen rajojen sisäpuolella [2, s. 61]. Kaikki kotelot täytyy suojata taka- ja sivutörmäykseltä FSAE:n sääntöjen B3.24 tai B3.26 mukaisesti. Jos akkukotelo tai kotelot sijoitetaan kuljettajan viereen, täytyy niille rakentaa oma sivutörmäyssuoja kuljettajan sivutörmäyssuojan lisäksi.

Akkukotelo täytyy valmistaa mekaanisesti kestävästä ja tulenkestävästä materiaalista. Jos kotelo tehdään lasi-, hiilikuiduista tai vastaavasta komposiitista, täytyy sidosaineen olla itsestään sammuvaa, sidosaineesta täytyy esittää datalehti katsastuksessa. Mikäli materiaali, josta kotelot valmistetaan, on sähköä johtavaa, täytyy kotelon ulkopinnalla olla matalaresistanssinen yhteys ohjausjärjestelmän maapotentiaaliin. Läpiviennit tai reiät akkukotelossa ovat sallittuja vain johtosarjan läpivientiin ja tuuletus reiksi. Nämä reiät tulee suojata kuten vetojärjestelmän sähköiset liitokset. Jokaiseen akkukoteloon täytyy liimata vähintään yksi 750 mm<sup>2</sup>:n tai suurempi tarra, jossa on musta salama keltaisella pohjalla tai punainen salama valkoisella pohjalla. Tarrassa pitää myös lukea "High Voltage", jos akkujännite on yli 60 voltia. Kuvassa 3 on esimerkki tällaisesta tarrasta.



Kuva 3. Korkeajännitevaroitustarra [1, s. 23]

Kaikkien akustojen, jotka voivat tuottaa räjähtäviä kaasuja, on akkukoteloon asennettava järjestelmä, joka estää kaasuja saavuttamasta syttymiskelpois-

ta seosta. Jokaisessa akkukotelossa, joka on täysin suljettu, täytyy olla paineentasausventtiili estämään korkeapaineen muodostuminen koteloon.

#### *2.4.15 High-Voltage Enclosure*

Jokaisen kotelon, joka sisältää korkeajänniteosia moottorin kotelaitteita lukuun ottamatta, täytyy merkitä edellä mainitulla korkeajännitevaroitustarralla. Näiden koteloiden pitää myös olla oranssin värisiä. Mikäli kyseiset kotelot ovat sähköisesti johtavia, täytyy niillä olla matalaresistanssinen yhteys ohjausjärjestelmän maapotentiaaliin.

#### *2.4.16 Charging*

Kilpailupaikalla on erillinen latausalue, jonka sisällä on sallittua ladata vetojärjestelmän akustoja. Akustoja saa ladata myös, kun ne ovat kiinni autossa tai pelkissä akkukoteloissaan, jos ne voidaan irrottaa autosta. Jos akkuja ladataan autossa, ei auton järjestelmien kanssa saa työskennellä. Myös jos akkuja ladataan autossa, on tilanpuutteen vuoksi tiimeille varattu ajat, jolloin akkuja saa ladata. Jos akkuja ladataan akkukoteloissaan, voi akkuja ladata milloin vain kilpailun aikana. Akkuja ladatessa ne täytyy merkitä seuraavat tiedot: tiimin nimi, turvallisuusvastaava ja arvioitu aika, milloin lataus päättyy. Ainoastaan sähkökatsastuksessa hyväksytyt ja sinetöidyt latauslaitteet ovat sallittuja. Kaikkien liitännöiden latauslaitteeseen täytyy olla eristettyjä ja suojattua, paljaat liitokset eivät ole sallittuja. Kennojen ja akustojen siirtäminen on sallittu vain akkukotelon sisällä. Jokaiselle tiimillä yksi 3P+N+PE, 6h, 400V/16A 50Hz standardin IEC 60309 mukainen voimavirtapistorasiasia.

#### *2.4.17 Accumulator Container Hand Cart*

Jos akku ladataan irrotettavassa akkukotelossa, täytyy sille tehdä oma jarrullinen työnnettävä kärry, joka on esitettävä sähkökatsastuksessa. Jarrun täytyy pystyä pysäyttämään ja pitämään paikallaan täyttä akkukotelokärryä. Kärryn täytyy kestää akkukoteloiden paino, jolle se on tehty, ja sitä pitää käyttää aina akkukoteloiden siirtoon kilpailupaikalla.

### **2.5 Katsastus**

Katsastus on jaettu kahteen osaan, sähköiseen ja mekaaniseen. Sähkökatsastus on ensin ja siinä tarkistetaan, että auto on sähköisesti turvallinen. Ennen tätä autoa saa liikutella vain, kun kaikki virtakytkimet ovat pois päältä -asennossa ja vetojärjestelmän virtakytkimen kahva on irrotettu ja turvalli-

suusvastaavan hallussa. Läpäistyään sähkökatsastuksen voi auto edetä mekaaniseen katsastukseen. Katsastuksessa myös sinetöidään ja merkitään erinäisiä osia autosta. Jos autossa on merkitsemättömiä osia, jotka pitää merkitä, tai rikottuja sinettejä, ei autolla saa kilpailla dynaamisissa osioissa, tai jos puutteet havaitaan sen jälkeen, voidaan auton suoritus hylätä kyseisessä dynaamisessa osiossa. Rikotut sinetit ja merkinnät voi korvata vain katsastuksessa. Sähkökatsastuksessa suoritetaan myös IMD- ja sadetesti. Katsastuksessa täytyy esittää seuraavat varusteet ja dokumentit:

- akustojen latauslaite jota käytetään kilpailun aikana
- kaikki akkukotelot joita käytetään kilpailun aikana
- datalehdet vetojärjestelmän jokaisesta osasta
- kopio ESF:stä
- kopio FMEA:sta
- akkukotelokärky jos sille on tarvetta.

Jos autossa on korkeajännitejärjestelmä, täytyy seuraavat varusteet esittää katsastuksessa:

- eristetyt kaapelileikkurit
- eristetyt ruuvimeisselit
- yleismittari suojaetuilla mittapäillä
- eristetyt lenkkiavaimet, jos vetojärjestelmässä on pultattuja sähköliitoksia
- suojalasit
- korkeajännite eristetyt hansikkaat
- korkeajännite eristetty matto, vähintään 1,5 m<sup>2</sup>.

Katsastuksessa auto myös punnitaan ajovalmiina, eli autossa täytyy olla kaikki mahdolliset nesteet sisällä. Tämä paino on auton virallinen paino kilpailussa. Dynaamisten osioiden jälkeen auto punnitaan uudestaan, ja paino saa vaihdella alkuperäisestä plus miinus 5 kg.

## 2.6 Kilpailu

Itse kilpailu koostuu kahdeksasta osiosta. Nämä osiot on jaettu staattisiin ja dynaamisiin osioihin. Staattisissa osioissa ei autolla ajeta eikä siltä edellytetä katsastusleimaa. Katsastamattomuus voi kuitenkin vaikuttaa joihinkin staattisten osioiden tuloksiin riippuen tuomareista ja syistä, joiden vuoksi autoa ei ole katsastettu. Dynaamisissa osioissa autolla ajetaan. Yksittäinen kuljettaja

saa osallistua vain kahteen dynaamiseen osioon kilpailun aikana lukuun ottamatta energiatehokkuutta joka, mitataan endurancen aikana. Kaikista osioista jaetaan pisteitä, ja yhteen laskettu maksimipistemäärä on 1000. Riippuen kilpailun tasosta eli siitä miten hyvin muut tiimit suoriutuvat, voittoon on tarvittu keskimäärin 800 pisteestä aina 950 pisteeseen.

### 2.6.1 *Static Events*

Staattiset osiot ja niiden pisteytys ovat samanlaiset kuin FSC:ssä. Niiden tarkoitus on testata tiimin tietoja autosta ja taloudellisia taitoja tuotekehityksen saralla. Näitä osioita on kolme:

- Cost Event 100 pistettä
- Business Plan Presentation 75 pistettä
- Engineering Design Event 150 pistettä.

Kahdessa ensimmäisessä muiden tiimien menestys vaikuttaa hieman pisteytykseen. Näistä kaikki ovat enemmän tai vähemmän arvostelulajeja, ja jokaiseen pitää lähettää etukäteen alustavia dokumentteja. Hyvällä valmistautumisella ja dokumenteilla voidaan saavuttaa hyvät pisteet, mutta voitto on tietenkin tavoiteltava, mikä edellyttää todella hyvää valmistautumista ja dokumentteja.

### 2.6.2 *Dynamic Events*

Dynaamisissa osioissa autolla ajetaan, mikäli edellyttää tietenkin hyväksytysti läpäistyjä katsastuksia ja testejä. Dynaamisissa osioissa autoa testataan käytännössä ja katsotaan, miten hyvin suunnitelmat vastaavat todellisuutta. Osioita on viisi:

- Skid Pad 75 pistettä
- Acceleration 75 pistettä
- Autocross 100 pistettä
- Efficiency 100 pistettä
- Endurance 325 pistettä.

Pisteytys ei dynaamisissakaan osioissa eroa FSC:stä, Efficiencyssäkin vain mittasuure on eri. Osiot on pyritty tekemään niin, että kuljettajan taidot vaikuttaisivat mahdollisimman vähän. Käytäntö on kuitenkin osoittanut, että etenkin Autocrossissa ja Endurancessa lahjakkaat kuljettajat pystyvät ajamaan voittaja-aikoja. Skid Padissa ja Accelerationissa voi lahjattomampikin



kuljettaja pärjätä, jos auto on hyvä ja kuljettaja on päässyt jonkin verran harjoittelemaan kyseisiä osioita.

## **2.7 Mahdolliset sääntömuutokset**

Kauden 2011 mahdolliset sääntömuutokset julkaistiin melko pian ensimmäisen FSE-kilpailun jälkeen. Koska nämä eivät ole vielä lopullisia sääntöjä, käydään niistä läpi vain merkittävimmät muutokset ja lisäykset.

Mahdollisia uusia säännöistä merkittävin on tehorajoitus 100 kW, jota valvotaan energiamittarilla; akuista ei saa minään hetkenä ottaa yli 100 kW tehoa. Kuljettajan on pystyttävä uudelleen aktivoimaan vetojärjestelmä ilman ulkopuolista apua. Autossa pitää olla myös vetojärjestelmän aktivointiäni joka mahdollisesti myöhemmin määritellään tarkemmin säännöissä.

Muutoksia ja tarkennuksia olemassa oleviin sääntöihin ensinnäkin on se että, moottorilla saa tehdä moottorijarrutusta, mutta vain sen verran kuin polttomoottorissa. Korkeajännitetasoa lasketaan 40 volttiin tasavirralla. Sadetesti tulee pakolliseksi, eikä vettä saa kertyä autoon. Mittauspisteiden ja vetojärjestelmän merkkivalon tyyppi ja paikka määritellään tarkemmin. Jos IMD tai BMS katkaisevat virran vetojärjestelmästä, ne eivät saa kytkeä sitä päälle, ennen kuin kuljettaja on huomannut sen. Korkeajännitejärjestelmään määritellään sulake, liitin tai elementti, jolla voidaan kytkeä korkeajännite pois päältä, jos esimerkiksi akkukoteloiden eristysreleet jumittuvat. Akkukotelon pitää olla suljettuna kaiken aikaa, eikä se saa vaatia erillistä suojausta, jos ja kun se on irti autosta.

### 3 AUTO

Kun kilpailun säännöt ovat selkeät, voidaan alkaa hahmottella millaisella autolla kilpaillaan. On hyvä asettaa tavoitteita itse kilpailulle ja sitä myöten autolle. Riittääkö, että jokainen osio suoritetaan kunnialla ja hyväksytysti loppuun, vai halutaanko voittaa jokin tietty osio tai peräti koko kilpailu? Tavoitteiden selvittyä voidaan selvittää, minkälaisen auton kyseisten tavoitteiden saavuttaminen vaatii. Kuten edellä mainittiin, ei tässä työssä keskitytä auton mekaaniseen suunnitteluun, koska siitä on jo hyvin kokemusta ja tietoa, vaan pikemminkin sähköisen voimapaketin toteutukseen sekä sen mitoittamiseen.

Tässä luvussa selvitetään suoritusarvovaatimukset sähkömoottoreille ja akuille. Lisäksi pohditaan, miten kyseiset komponentit kannattaisi sijoittaa autoon ja kuinka paljon kutakin tarvitaan. Määritellään auton suorituskykytavoitteet ja lähtökohdat, joista tarkempi suunnittelu voi lähteä liikkeelle.

#### 3.1 Mitoitus

Jotta tiedettäisiin, minkä kokoiset moottorit ja akut ovat riittäviä, täytyy selvittää, kuinka suuret ovat autoon vaikuttavat voimat kulkusuunnassa. Suurimmat auton etenemiseen vaikuttavat voimat ovat ilmanvastus-, vierintävastus-, kiihdytysvastus-, voimansiirto- ja nousuvastusvoima. Näiden voimien summasta muodostuu kokonaisvastusvoima, joka täytyy ylittää, jotta auto liikkuisi eteenpäin. Näistä vähiten merkittävä voima FS-autossa on nousuvastus, koska autolla kilpaillaan lähes tasaisilla radoilla, joissa ei ole juurikaan korkeusvaihtelua. Nousuvastusta ei siis huomioida näissä laskuissa. Kun tiedämme olennaiset ajovastukset, voimme laskea, kuinka paljon energiaa kuluu ja kuinka paljon tehoa tarvitaan enimmillään. Tämän luvun tarkoitus on selvittää keinot ajovastusten ja energiantarpeen selvittämiseen.

##### 3.1.1 Vierintävastus

Vierintävastus on voima, joka vastustaa auton vierimistä tienpinnalla. Siihen vaikuttavat tienpinta, renkaat, laakerit, jarrut, rengaspaineet, alustan asetukset, auton massa, renkaan ja tienpinnanlämpötila. Laakereista ja jarruista tuleva vastus on pienin, enintään prosentin verran koko vierintävastuksesta. Suurin osa vierintävastuksesta tulee renkaan ja tienpinnan välisestä muodonmuutoksesta, FS-autojena tapauksessa renkaat muuttavat muotoaan,

kun tienpinta on kova. Koska muuttujia on paljon ja ne kaikki vaikuttavat lopputulokseen, on vierintävastuskertoimen laskeminen vaativaa siinä määrin, että siitä voisi kirjoittaa erillisen insinööriyön. Vierintä- ja ilmanvastuksen selvittämiseksi suoritettiin HPF010:llä niin sanottu coastdown-testi. Tässä testissä auto kiihdytetään mahdollisimman suureen nopeuteen ja sen jälkeen annetaan rullata vapaasti niin pitkälle kuin se pääsee. Auton peräväliitys poistettiin tätä testiä varten, jotta tuloksista ei tarvitse eritellä voimansiirtovastuksia. Kun tiedämme auton massan ja hidastuvuuden vapaan rullauksen aikana, voimme määritellä autoa hidastavan voiman kaavalla 1.

$$F_k = a \cdot m \quad (1)$$

$F_k$  = kokonaisvastusvoima (N)

$a$  = hidastuvuus ( $\text{m/s}^2$ )

$m$  = auton massa (kg)

$F_k$  koostuu vierintävastuksesta ja ilmanvastuksesta. Pienillä nopeuksilla (alle 10 km/h) ilmavastus on lähes olematon, noin 1 newton tai pienempi. Kun kokonaisvastusvoima lasketaan pienillä nopeuksilla, saamme kokonaisvierintävastuksen riittävällä tarkkuudella. Tästä voidaan laskea kokonaisvierintävastuskerroin kaavalla 2 [3, s. 87]:

$$\frac{F_R}{F_V} = \mu_R \quad (2)$$

$F_R$  = renkaiisiin ja autoon vaikuttava vierintävastusvoima (N)

$F_V$  = renkaiisiin kohdistuva pystysuoravoima (N)

$\mu_R$  = vierintävastuskerroin

Näin saadaan kerroin, jolla voidaan määritellä eripainoisille autoille vierintävastus. Kerroin pätee tarkasti vain HPF010:n mittaushetken asetuksilla, mutta toimii riittävän tarkasti vastaavanlaisessa autossa samanlaisilla renkailla. Renkaina mittauksessa käytettiin Hoosierin sileäpintaisia 20.0 x 7.5–13 FSAE-kilparenkaita.

### 3.1.2 Ilmanvastus

Ilmanvastus syntyy, kun auto tai kappale liikkuu ilmassa. Tähän vaikuttavat auton poikkipinta-ala, auton ilmanvastuskerroin, johon vaikuttaa auton muotoilu. Aiemmin lasketusta kokonaisvastuksesta vähennetään laskettu vierintävastus ja jäljelle jää ilmanvastusvoima. Ilmanvastuksen kaavasta voidaan laskea ilmanvastuskerroin seuraavalla kaavalla 3 [5, s. 3]

$$C_W = \frac{F_i}{\frac{\rho}{2} C_W A v^2} \quad (3)$$

$\rho$  = ilmantiheys ( $\text{kg/m}^3$ )

$C_W$  = kappaleen ilmanvastuskerroin

$A$  = kappaleen poikkipinta-ala ( $\text{m}^2$ )

$v$  = kappaleen nopeus ilmassa ( $\text{m/s}$ )

Kun auto seisoo paikoillaan, ei ilmanvastusta ole olettaen, ettei tuule. Ilmanvastus kasvaa auton ilmanopeuden myötä. Yli sadan kilometrin tuntinopeuksissa ilmanvastus alkaa kasvaa jyrkästi ja muodostaakin suurimman ajovastuksen korkeilla nopeuksilla. Koska FS-kilpailuissa harvoin noustaakaan yli sadan kilometrin nopeuksiin, niin auton katteiden suunnittelussa on yleensä tyydytty siihen, mikä näyttää sulavalta. Ilmanvastuskerroin on autokohtainen kuten vierintävastuskerroinkin, mutta suunniteltaessa samankaltaista ja -kokoista autoa voidaan käyttää coastdown-testistä saatuja tuloksia.

### 3.1.3 Kiihdytysvastus

Auto kiihtyy kun sitä eteenpäin vievä voima on suurempi kuin sitä vastustavat voimat. Tällöin auton liiketila eli nopeus muuttuu; tätä muutosta vastustavaa voimaa kutsutaan kiihdytysvastukseksi. Kaava 4 on kiihdytysvastukselle [11. s. 50].

$$F_a = a \cdot m \quad (4)$$

$F_a$  = kiihdytysvastus (N)

$m$  = massa (kg)

$a$  = kiihtyvyys ( $\text{m/s}^2$ )

Kiihtyvyys on sitä suurempi, mitä suurempi on pyöriltä tiehen välitetyn voiman ja vastusvoimien erotus. Jotta auto kiihtyisi mahdollisimman nopeasti, on kiihtyvyyden oltava mahdollisimman suuri. Jottei kiihdytysvastus kasvaisi liian suureksi, on massan oltava mahdollisimman pieni. Myös pyörivien massojen kiihdyttäminen pitäisi ottaa huomioon. Tässä tapauksessa niitä ei vielä tunneta, koska ollaan määrittelemässä suoritusarvoja eikä voida turvautua testaukseen kuten ilmanvastuksen ja vierintävastuksen kanssa. Electric Vehicle Technology Explained -kirjassa ongelma on ratkaistu esimerkkilaskulla, josta on laskettu tyypillisen sähköauton pyörivien massojen massa ja laskettu prosenttiosuus auton kokonaismassasta [4, s. 187]. Tällä prosentilla neuvotaan kertomaan kokonaiskiihdytysmassa, kun ei tiedetä sähkömoottorin roottorin inertiaa. Kaava 5 on pyörivien massojen laskemiseen.

$$F_{\omega a} = I \frac{G^2}{\eta_g r^2} a \quad (5)$$

$F_{\omega a}$  = pyörivien massojen kiihdytysvastus

$I$  = pyörivien massojen inertia

$G$  = kokonaisvälitys

$\eta_g$  = voimansiirron hyötysuhde

$r$  = renkaansäde

$a$  = kiihtyvyys

Kirjassa annettua prosenttiosuutta ei voi kuitenkaan suoraan käyttää FSE-autoon, koska se on laskettu tyypillisen sähköhenkilöauton arvoilla. FSE-auton tehopainosuhde on paljon suurempi, ja välitys voi olla hyvin erilainen sekä renkaan koko on pienempi. Koska noista vain renkaan koko voidaan määritellä, käytetään laskuissa yläkanttiin arvioitua lukua 15 %, jolla kerrotaan kiihdytettävä massa.

### 3.1.4 Voimansiirtovastus

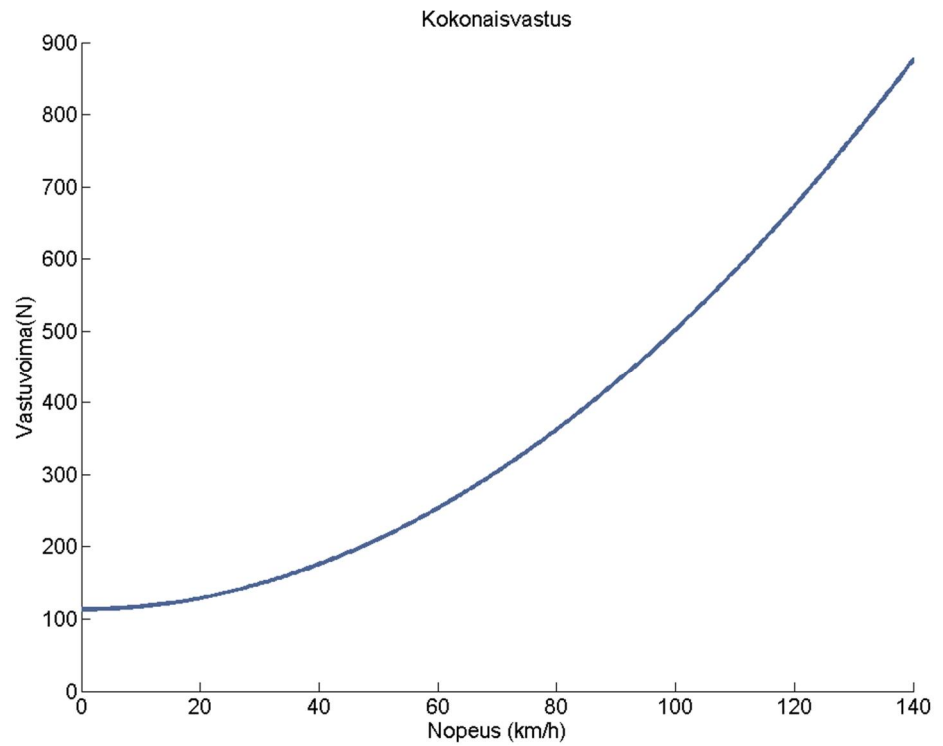
Voimansiirtovastus on käytännössä voimansiirron hyötysuhde tai voimansiirtohäviö. Näin ollen se ei ole varsinainen vastusvoima vaan kerroin, joka lisätään mahdolliseen välitykseen. Ne muodostuvat rattaiden ja ketjujen hammaskosketuksista, jotka kuitenkin ovat niin pieniä eikä niitä voi laskea niin tarkasti, ellei kaikkia komponentteja tiedetä, että arvio riittää hyvin. Sähköautossa todennäköisesti on korkeintaan vain yksi välitys tai ei välitystä ollenkaan. Suoravetoisen voimansiirron tapauksessa hyötysuhde on käytännössä 1 riippuen vetoakselien toteutuksesta ja ajotilanteesta. Jos käytetään ketju- tai hammasvälitystä, on hyötysuhde hieman pienempi, noin 0,98.

### 3.1.5 Kokonaisvastus

Kokonaisvastus on laskettujen vastusvoimien summa. Tämä vastusvoima on voitettava, jotta auto kiihtyisi. Lähtötilanteessa se tarkoittaa auton liikkeelle saamista. Kun kokonaisvastus on yhtä suuri kuin auton tiehen välittämä voima, on auto saavuttanut huippunopeutensa. Kertomalla vastusvoimat renkaan säteellä saadaan vääntömomentti vetoakselille. Riippuen välityksestä tästä voidaan helposti laskea vääntömomentti, jonka moottorin tarvitsee tuottaa, jotta auto liikkuisi. Vääntömomentin tarve kasvaa nopeuden myötä, koska ajovastukset kasvavat.

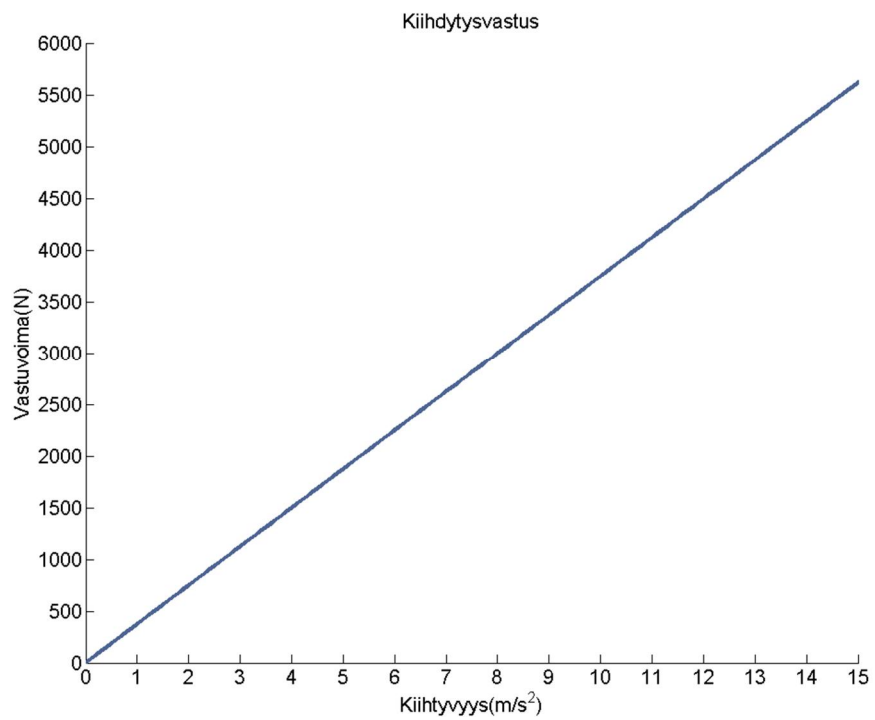
### 3.1.6 Tulokset

Coastdown-testi suoritettiin kaikilla katteilla ja ilman sivukatteita, ja kumpakin versioon tehtiin kuusi mittaus ajoa. Näiden ajojen hidastuvuudet laskettiin ja keskiarvoista laskettiin vastuskertoimet. Coastdown-testin perusteella vierintävastuskertoimeksi saatiin 0,0325. Kerroin on sama kaikille nopeuksille, vaikka se todellisuudessa nouseekin hieman nopeuden myötä. Nousu on kuitenkin vähäistä verrattuna ilmanvastusvoimaan. Ilmanvastusvoima saatiin, kun vierintävastusvoima vähennettiin kokonaisvastusvoimasta ja edellä mainitulla kaavalla laskettiin ilmanvastuskerroin. Kaikilla katteilla ilmanvastuskertoimeksi saatiin 0,65 ja ilman sivukatteita 0,61. Kerroin vaikuttaa realistiselta ottaen huomioon, että kyseisessä autossa on avoimet pyörivät renkaat, joiden ilmanvastuskerroin on luokkaa 0,5 [5. s. 408]. Kokonaisvastusvoima on esitetty tasanopeuden funktiona kuvassa 4.



Kuva 4. Ajovastus nopeuden funktiona

Kiihdytysvastus eri kiihtyvyyksillä on esitetty kiihtyvyyden funktiona kuvassa 5.



Kuva 5. Kiihdytysvastus kiihtyvyyden funktiona

### 3.1.7 Simulointi

Kun auton ajovastukset on selvitetty, voidaan simuloida auton suorituskykyä ja energiankulutusta. Eniten energiaa kuluu endurancessa, jonka mukaan akusto mitoitetaan. Suurin mahdollinen suorituskyky tarvitaan kiihdytyksessä. Tilannetta lähdetään tarkastelemaan tienpinnasta vetoakselia kohti ja lasketaan kuinka, paljon vastusvoimia on voitettava, jotta saavutetaan haluttu suorituskyky. Näitä kahta ajo-osiota simuloimalla saamme tarvittavat suoritusarvot moottorille ja akustolle. Auton ajovastuksiin vaikuttavilla tekijöillä ja komponenteilla voidaan vaikuttaa suorituskykyyn, mutta ne vakioidaan näissä simulaatioissa. Arvot perustuvat olemassa olevaan FS-autoon lukuun ottamatta massa, joka on arvio siitä, mitä FSE-auto painaisi 75 kiloisen kuljettajan kanssa.

Endurancen kokonaispituus on määritelty noin 22 kilometriin mittaiseksi. Yhden kierroksen pituutta ei ole määritelty, mutta radan täytyy sisältää eri elementtejä, kuten pujottelu, hitaita ja nopeita mutkia ja suoria. Myös huippu- ja keskinopeudelle on annettu suosituksia, keskinopeudelle noin 48–57 km/h ja huippunopeudeksi noin 105 km/h [2, s. 87]. Radat vaihtelevat vuosittain hieman, mutta täyttävät kuitenkin sääntöjen suositukset ja määräykset. Auton arvot, joita simuloinnissa käytetään ovat

| Renkaan säde (m) | Auton Massa (kg) | Vierintävastuskerroin | Ilmanvastuskerroin | Otsapinta-ala (m <sup>2</sup> ) |
|------------------|------------------|-----------------------|--------------------|---------------------------------|
| 0,2667           | 350              | 0,0325                | 0,65               | 1                               |

Endurancen simulointiin tässä työssä käytetään vuoden 2009 FSG:n endurancen ensimmäistä puoliskosta tiedonkeruulla tallennettua lokia. Tuolloin kierroksen pituus oli 847 metriä, joten kierroksia ajettiin kokonaisuudessa 26 kappaletta. Datasta käytetään auton nopeustieto, joka pohjautuu eturenkaiden pyörimisnopeuteen. Ilmanvastus lasketaan kullakin ajanhetken mukaisella nopeudella. Kiihtyvyys lasketaan ajonopeudesta. Kiihdytys-, ilman- ja vierintävastus lasketaan yhteen. Vääntömomentti saadaan kaavalla 6 [6, s. 37]:

$$M = F \cdot r \quad (6)$$

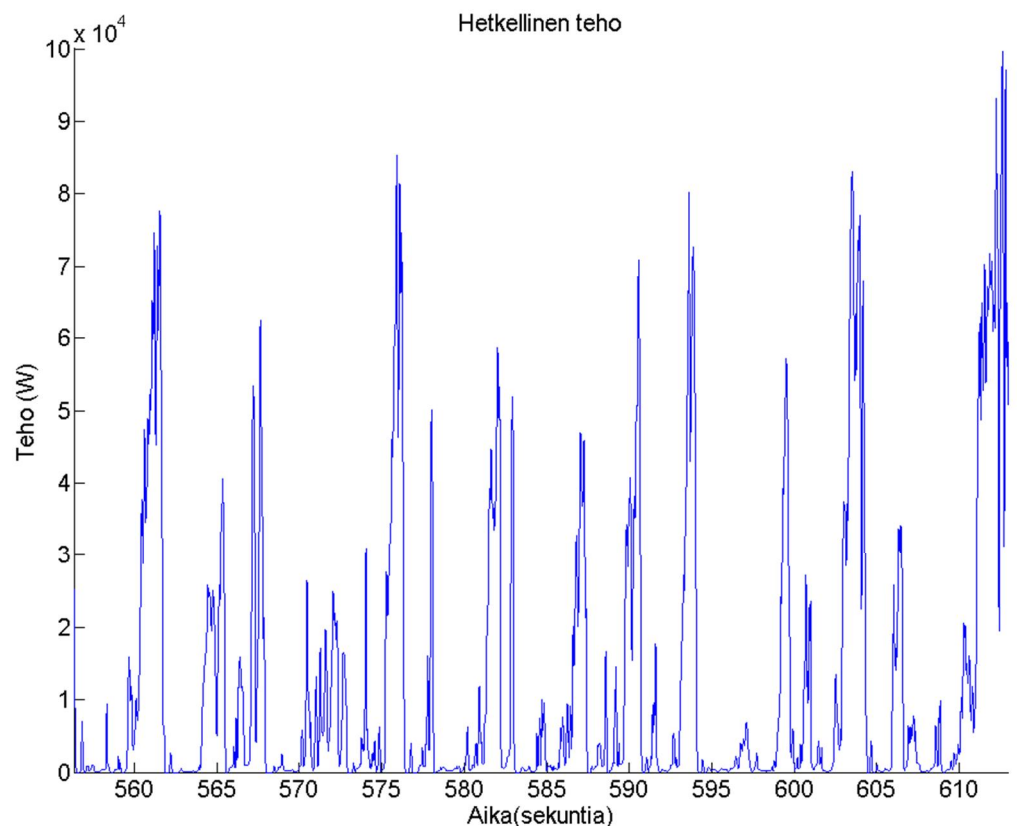
M = vääntömomentti (Nm)

F = renkaaseen kohdistuva voima (N)



$r$  = renkaansäde (m)

Renkaan kulmanopeus lasketaan ajonopeudesta. Teho vetoakselilla tulee, kun vääntömomentti kerrotaan renkaan kulmanopeudella. Laskenta suoritetaan niin, että kun vääntömomentti negatiivista, on teho nolla. Kun vääntömomentti on suurempi kuin nolla, lasketaan sillä kulloinenkin teho. Tässä ei siis huomioida jarrutusenergian talteenottoa. Teho integroidaan, jolloin saadaan energiantarve vetoakselilla jouleina eli wattisekunteinä. Tässä tapauksessa on käytössä polttomootorilla ajettu suoritus, ja sitä ei ajeta välttämättä aivan samalla tavalla kuin sähkömootoria, mutta ero luultavimmin ole kovin merkittävä. Rintarinnan ajaminen on kielletty endurancessa, mutta muut autot radalla voivat vaikuttaa kierrokseen. Autojen ajojärjestys on kuitenkin järjestetty niin, että radalla olisi samaan aikaan mahdollisimman samantasoisia autoja. Näin pyritään vähentämään kanssakilpailijoiden vaikutusta toistensa suorituksiin. Nyt simuloidaankin ensin yksittäinen kierros ensimmäisen osion loppupuolelta. Tämä kerrotaan ajetuilla kierroksilla, jolloin saadaan koko enduranceen. Kuva 6 esittää tehon tarvetta vetävällä akselilla ajan funktiona.



Kuva 6. Tehon tarve yhden kierroksen aikana ajan funktiona

Energian tarve koko endurancen aikana perustuen yhteen kierrokseen on noin 6,07 kWh eli 21,852 MJ. Kun simuloidaan koko ensimmäinen ajopuolisko ja kerrotaan kahdella, koska endurance koostuu kahdesta ajopuoliskosta, niin energiaa kuluu noin 5,82 kWh eli 20,952 MJ. Pienempi energiantarve johtuu siitä, että samaan aikaan ajanut auto oli nopeampi ja se piti päästää ohi. Kun tuloksia verrataan vuoden 2010 FSE-kilpailujen energiankulutustuloksiin (liite 3), vastaavat ne melko hyvin nopeimman auton, joka oli Stutgartin auto, käyttämää energia määrää. Kilpailussa mitattu energia on kuitenkin se mikä, on otettu akuilta moottoreille, eikä vetävällä akselilla käytetty energia kuten simulaatiossa. Auton lähtöarvot simulaatiossa ovat kuitenkin melko pessimistiset, ja tarkemmilla arvoilla päästäisiin tarkempiin tuloksiin. Kilpailun tulokset kuitenkin osoittivat, että simulaatio on oikean suuntainen.

Hyödyntämällä jarrutusenergiaa mukaan otettavan energian määrää voidaan vähentää merkittävästi, jolloin akkuja tarvitaan vähemmän, minkä myötä auto olisi kevyempi. Jos kaikki jarrutusenergia saataisiin talteen, olisi mukaan otettavan energiantarve noin 1,34 kWh. Tuossa laskussa ei kuitenkaan ole otettu huomioon painonsiirtoa, ja sähkömoottoreilla suoritettaisiin koko auton jarruttaminen.

Kiihdytyksen simuloinnilla voidaan selvittää, miten paljon vääntöä taka-akselille pitää tuottaa, jotta saavutetaan haluttu kiihtyvyys. Kiihdytys on FS-kisoissa 75 metrin pituinen matka, joka ajetaan niin, että auto lähtee paikoiltaan ja sillä ajetaan maaliin asti, nopein aika voittaa. Ajanotto yleensä suoritetaan valokennoilla ja auto asetetaan lähdössä niin, että ajanotto alkaa heti, kun auto liikaa eteenpäin. Kilpailussa ajat ovat olleet, riippuen hieman olosuhteista, vähän päälle neljän sekunnin luokkaa. Voittaja aika on alle neljä sekuntia, 3,9 tai jopa 3,7, mutta noihin aikoihin kaiken pitää osua kohdalleen. Tässä simuloinnissa pyritään laskemaan teoreettinen kiihtyvyys samalla periaatteella kuin endurancen simuloinnissa eli tarkastellaan, miten paljon momenttia pitää tuottaa taka-akselille, jotta saavutettaisiin 4 sekunnin aika.

Auton kiihtyvyys voidaan laskea, kun tiedetään käytettävissä oleva voima, autoon vaikuttavat ajovastukset ja auton redusoitumassa joka, käsittää pyörivien massojen inertian. Hetkellinen kiihtyvyys lasketaan kaavan 7 mukaan. Tässä tapauksessa emme kuitenkaan tiedä välityksiä tai voimansiirron hyötysuhdetta ja tarkoituksena on vain laskea, kuinka paljon vääntöä tarvitaan

taka-akselille. Niinpä käytettävissä oleva voima vain jaetaan renkaansäteellä.

$$a = \frac{\frac{M_m}{R_d} - F_k}{m_{red}} \quad (7)$$

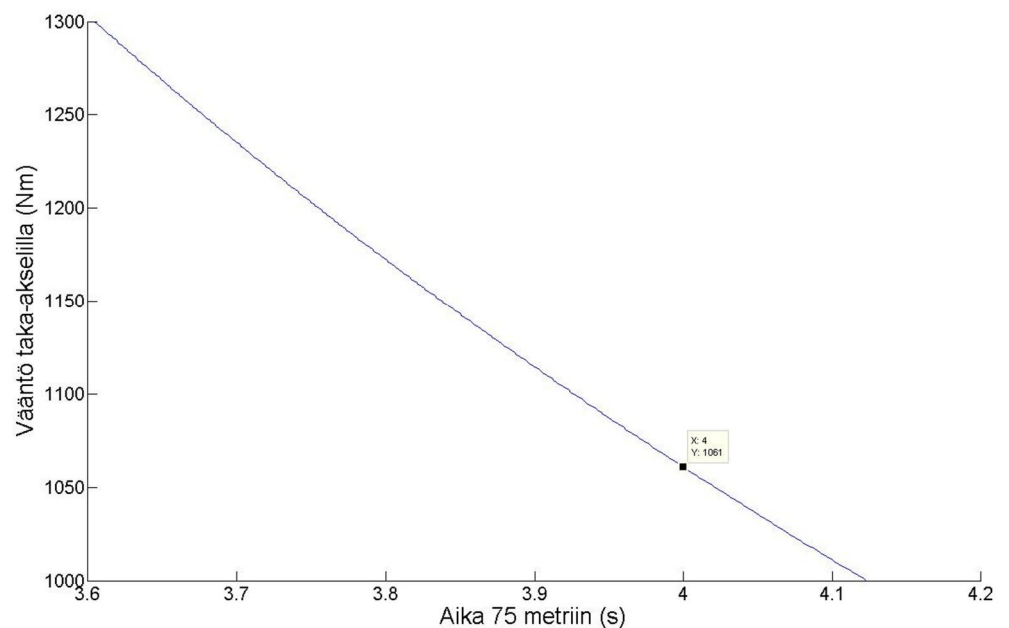
$a$  = kiihtyvyys ( $\text{m/s}^2$ )

$F_k$  = kokonaisajovastus (N)

$M_m$  = moottorin vääntömomentti (Nm)

$R_d$  = renkaansäde (m)

Moottorin vääntömomentti ja ajovastukset muuttuvat nopeuden myötä. Kiihtyvyys lasketaan kullekin ajanhetkelle halutulla aikavälillä nolasta n:teen hetkeen. Aikaväli pitää valita niin, että auto ehtii saavuttamaan halutun matkan tai nopeuden. Nopeus saadaan, kun kiihtyvyys integroidaan ja matka kun nopeus integroidaan. Auton arvot ovat samat kuin endurancen simuloinnissa vain taka-akseliin vaikuttava vääntömomentti muuttuu. Emme tiedä tarkkaa vääntömomenttikuvaajaa nopeuden funktiona, joten kiihtyvyydet lasketaan tasamomentilla. Aika 75 metrin kiihdytykselle on kuvattu kuvassa 7. eri vääntömomenteille kiihdytysajan funktiona.



Kuva 7. Vääntömomentti 75 metrin kiihdytysajan funktiona

Kuten kuvaajasta voi nähdä, saavutetaan neljän sekunnin aika 1061 Nm:n ja sitä suuremmilla vääntömomenteilla taka-akselilla. Tämä on kuitenkin teoreettinen kiihtyvyys, jolloin rengas pystyy välittämään kaiken voiman tiehen ilman häviöitä. Tämä edellyttää, että kitkakerroin renkaan ja tienpinnan välillä on ääretön eikä se muutu missään vaiheessa.

Autolla on siis kitkasuorituskyky, joka määrittelee, miten paljon voimaa tiehen voidaan välittää tietyllä kitkakertoimella, ilman että pyörät menettäisivät pidon. Tämä on huomioitava väännön tarvetta määriteltäessä, jottei tuotettavaa voimaa mene hukkaan. Kitkasuorituskyky saadaan kaavalla 8 ja dynaaminen painonsiirtokerroin takavetoiselle autolle kaavalla 9 [7, s. 70].

$$F_{ke\max} = \mu \cdot \omega_t \cdot m \cdot g \quad (8)$$

$$\omega_t = \frac{s_e + f \cdot h}{l + \mu \cdot h} \quad (9)$$

$\mu$  = kitkakerroin

$\omega_t$  = dynaaminen painonsiirtokerroin

$m$  = auton massa (kg)

$g$  = putoamiskiihtyvyys ( $\text{m/s}^2$ )

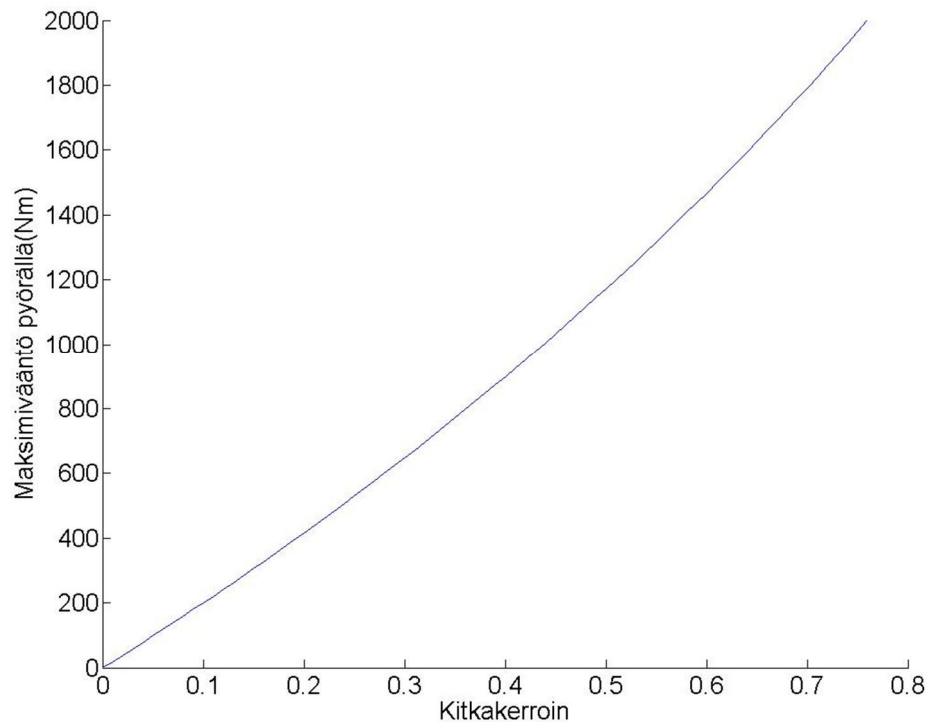
$s_e$  = painopisteenetäisyys etuakselista (m)

$l$  = akseliväli (m)

$f$  = vierintävastuskerroin

$h$  = painopisteenkorkeus (m)

Auton tarkkoja mittoja ei vielä voida tietää, joten laskuissa on käytetty HPF 010:n mittoja, vain massa on muutettu 350 kiloon kuten muissakin simuloinneissa. Kuva 8 esittää maksimivääntömomenttia taka-akselilla eri kitkakertoimilla. Kuvaajasta voidaan nähdä että noin 1100 Nm:iin tarvitaan vain 0,48 kitkakerroin. Kuivalla asfaltilla HPF 010:ssa käytettyjen renkaiden kitkakerroin on arvioitu välille 1,2–1,4, joten kitkasuorituskykyä on riittävästi.



Kuva 8. Kitkasuorituskyky, vääntömomentti taka-akselilla kitkakertoimen funktiona

Simulaatiot ja niiden tuottamat kuvaajat on tehty MatLab-ohjelmalla. Liitteet 1 ja 2 sisältävät simulaatioissa käytetyn ohjelmointikoodin. Simulaatiot voidaan suorittaa helposti erilaisilla auton arvoilla muuttamalla vain alkuarvoja, esimerkiksi painoa ja renkaandynaamista sädetä. Endurancen simuloinnissa voidaan käyttää myös muista enduranceista tai tiedonkeruista ylipäättänsä auton nopeutta. Tällöin pitää kuitenkin huomioida nopeus datan näytteenottotaajuus ja taulukot pitää sovittaa näytteiden kokonaismäärään, jos niitä halutaan enemmän kuin tässä käytetyn 414500 näytteen verran.

### 3.2 Sähkömoottori

Sähkömoottori on sähkömekaaninen laite, joka muuttaa sähköenergian mekaaniseksi liikkeeksi, tässä tapauksessa pyöriväksi liikkeeksi. Sähkömoottoreita on ollut olemassa jo 1800-luvulta alkaen, mutta niiden todellinen hyötykäyttö alkoi vasta 1800-luvun lopulla. Nykyään sähkömoottoreita käytetään laidasta laitaan kaikenlaisissa sovelluksissa aina rannekelloista valtameriristeilijöiden propulsioon. Sähkömoottorin hyötysuhde on hyvä, 85–95% riippuen hieman moottorityypistä.

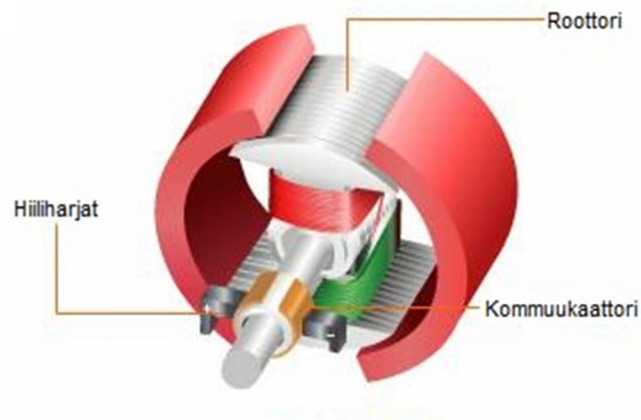
Sähkömoottori on myös mekaanisesti melko yksinkertainen; perusrakenteeseen kuuluu roottori, joka pyörii, ja staattori, joka on moottorin runko, eli se

pysyy roottoriin nähden paikallaan. Ainoat mekaanisesti kuluvat osat ovat laakerit, jonka varassa roottori pyörii sekä mahdolliset liukurenkaat ja harjat. Yleisesti sähkömoottorin toiminta perustuu olemassa olevan magneettikentän muuttamiseen. Olemassa oleva magneettikenttä luodaan joko kestopagneeteilla tai sähköllä. Sähköllä luodaan uusi vastakkaissuuntainen magneettikenttä nähden olemassa olevaan magneettikenttään. Nämä magneettikentät pyrkivät yhdensuuntaisiksi. Tämä muutos aiheuttaa vääntöä roottoriin, joka kääntyy, kunnes magneettikentät ovat yhdenmukaisia. Muuttuvaa kenttää pyöritetään olemassa olevaan nähden, jotta saadaan aikaan jatkuva pyörivä liike. Riippuu moottorista, mihin olemassa oleva ja muuttuva magneettikenttä on sidottu.

Sähkömoottoreita on useita erityyppisiä, joita lukemattomat eri valmistajat tekevät. Sähkömoottorit toimivat joko tasa- tai vaihtovirralla. Tämä määritelmä on kuitenkin hieman häilyvä, koska jossain moottoreissa tasavirtaa pitää ohjata tai moduloida vaihtovirran kaltaiseksi. Nyt tarkastellaan yleisimpiä moottorityyppejä, jotka soveltuisivat ylipäättänsä ajoneuvoon, ja pohditaan, mitä on huomioitava, kun sähkömoottoria sovitetaan FSE-autoon.

### 3.2.1 *Harjallinen tasavirtasähkömoottori*

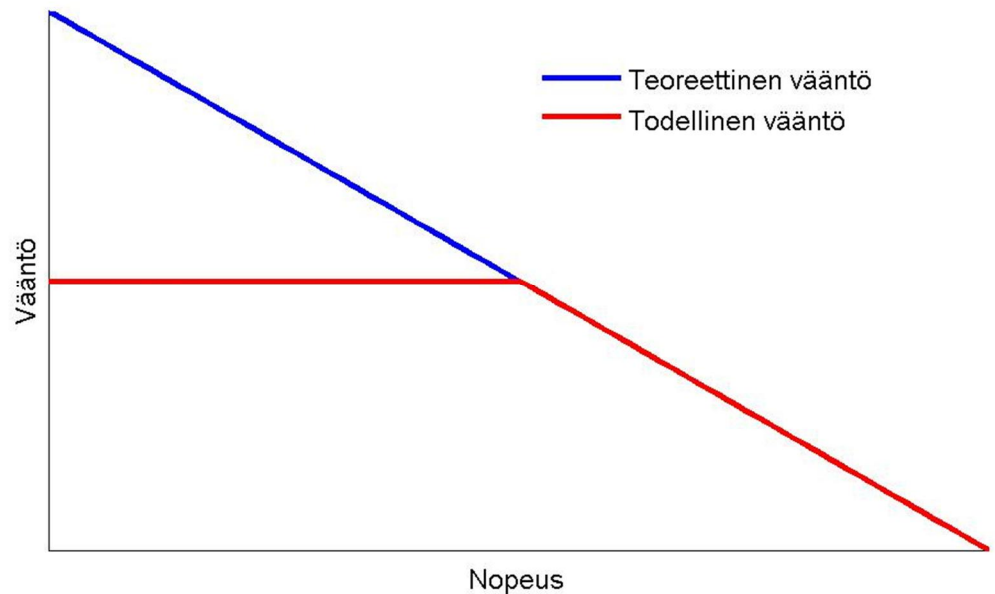
Harjallisessa sähkömoottorissa olemassa oleva magneettikenttä on staattorisissa, ja yleensä käytetään kestopagneetteja. Muuttuva magneettikenttä luodaan roottorissa olevaan sähkömagneetilla, esimerkiksi rautaytimen ympärille kiedotulla kelalla. Roottorin akselin päässä on kommukaattori, jossa on kaksi metallilevyä, joista toinen on yhdistetty kelan toiseen päähän ja toinen toiseen päähän. Kommukaattorin levyjä painavat ”harjat”, joista toinen on yhdistetty virtalähteen positiiviseen napaan ja toinen negatiiviseen napaan. Nämä harjat pysyvät paikoillaan ja ovat kiinni moottorinrungossa. Kuva 9 näkee yksinkertaistetun moottorin rakenteen. Kun sähkövirtaa johdetaan moottoriin, pyrkivät magneettikentät yhdensuuntaisiksi ja roottori pyörii. Samalla kuitenkin kommukaattori pyörii ja levyjen napaisuus vaihtuu jolloin, sähkövirta kulkee toiseen suuntaan. Magneettikentät ovat jälleen erilaisia jotta ne pyrkivät yhdensuuntaisiksi kääntäen jälleen roottoria, jonka inertia pitää pyörivän liikkeen samansuuntaisena.



Kuva 9. Tasavirtasähkömoottorin rakenne [8, s. 1]

Näin yksinkertaisessa moottorissa on omat ongelmansa. Kommukaattorin levyjen välisen raon täytyy olla tarpeeksi suuri, jotta harjat eivät yhtä aikaa kosketaisi kumpaakin levyä. Jos moottori pysähtyy tai on sellaisessa asennossa, että harjat eivät kosketa kumpaakaan levyä, niin ei se lähde käyntiin ilman ulkoista apua. Tämä ongelma yleensä ratkaistaan lisäämällä kommuukaattori levyjen määrää. Jännitteellä säädetään moottorin nopeutta ja virralla moottorin vääntöä, ja kaikkeen tähän tarvitaan vain tasavirtaa. Harjat kuitenkin kuluvat ja vaativat jonkin verran huoltoa.

Moottori toimii myös generaattorina eli tuottaa sähkövirtaa, jos sitä pyöritetään ulkoisesti käämin kulkiessa magneettikentän läpi. Käämeihin indusoituu syötettävään virtaan nähden vastakkaissuuntaista virtaa, kun se pyörii omin voimin. Tätä virtaa kutsutaan nimellä "back electromagnetic force (BEMF)", ja se kasvaa moottorin pyörimisnopeuden mukaan. Moottoriin syötetyn virran täytyy ylittää tämä BEMF-virta jotta se pyörisi, tämä vaikuttaa suoraan moottorin vääntömomenttiin. Moottorin huippuvääntö on nollakierrosluvulla, mutta käytännössä virtaa rajoitetaan sen mukaan, mitä moottorin käämit kestävätkin. Kuva 10 esittää teoreettista ja todellista vääntökuvaajaa nopeuden funktiona.



Kuva 10. Sähkömoottorin teoreettinen ja todellinen vääntökuvaaja

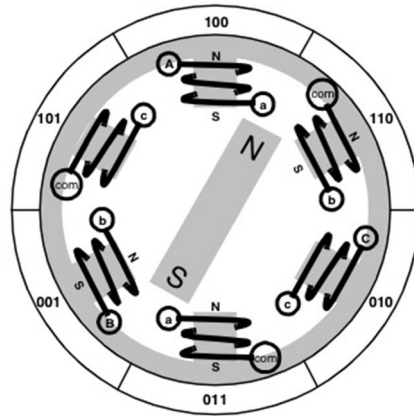
BEMF myös osaltaan rajoittaa moottorin suurinta pyörimisnopeutta. Koska käytännössä virtaa rajoitetaan, saadaan sähkömoottorille tasainen vääntö laajalle kierrosalueelle siihen pisteeseen asti, jolloin BEMF kasvaa riittävän suureksi.

### 3.2.2 Harjaton tasavirtasähkömoottori

Harjattomassa sähkömoottorissa nimensä mukaan ei ole harjoja. Harjattomissa moottoreissa roottorissa on kestopagneetit ja staattorissa magneettikenttää muuttava käämitys. Kuva 11 havainnollistaa hyvin, millainen harjattoman moottorin rakenne on. Harjattomissa moottoreissa on yleensä sähköisesti kytketty kolme käämiä tähti- tai kolmiokytkennässä. Nämä on jaettu fyysisesti useampaan kelaan. Pohjimmiltaan toimintaperiaate on melko samanlainen kuin harjallisella moottorilla: magneettikenttää muutetaan ja roottori kääntyy ja magneettikenttää muutetaan taas. Nyt ei kuitenkaan ole mitään mekaanista osaa moottorissa, joka kääntäisi, jakaisi tai ohjaisi virtaa käämeissä. Moottorinohjainlaite siis kytkee virtaa yhteen tai kahteen käämiin ja johtaa sen pois kahden tai yhden käämin kautta. Näin ollen moottorille ei voida syöttää suoraan tasavirtaa vaan sitä pitää katkoa oikeassa järjestyksessä, jotta moottori pyörisi. Harjaton tasavirtamoottori onkin vaihtovirtamoottori, koska toimiakseen siihen syötettävän virran tarvitsee vaihdella. Teoriassa moottori pyörisi pelkällä vaihtosähkölläkin, jos mitoitus on kohdal-



laan. Yleensä käyttökohteissa on kuitenkin akku, joka antaa vain tasavirtaa, joka pitää muuttaa sopivaksi moottorille ohjainlaitteella tai invertterillä.



Kuva 11. Harjattomantasavirtamoottorin rakenne [9, s. 1]

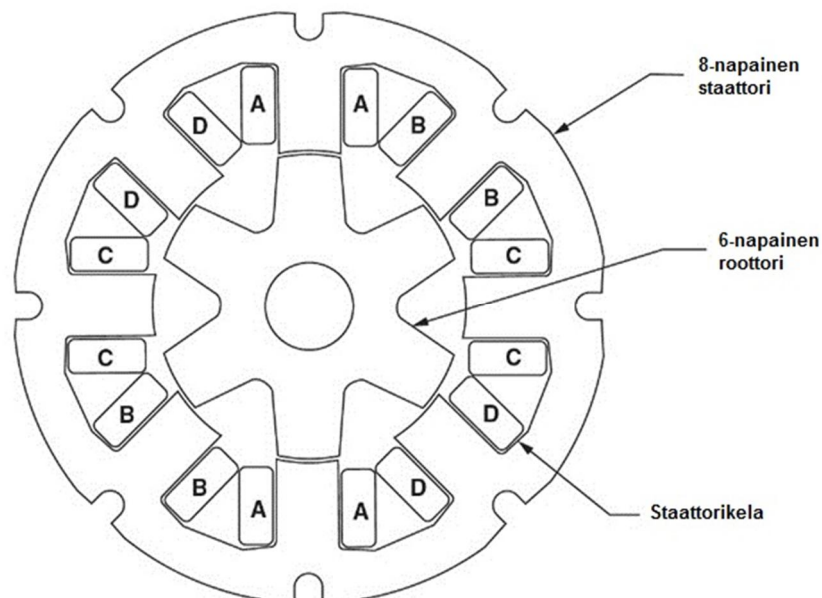
Ohjaus onkin hieman monimutkaisempaa kuin harjallisessa moottorissa. Jokaisista käämiä kohden tarvitaan kaksi "kytkintä", joilla ohjataan, meneekö virta käämiin vai tuleeeko virta käämistä. Ohjainlaitteen tarvitsee tietää, miten se kytkee käämit, jotta roottori saadaan pyörittämään sekä milloin ne kytetään. Järjestys pysyy samana, mutta nopeuden kasvaessa ajoitus muuttuu. Jotta moottori pyörisi, tarvitsee ohjainlaitteen tietää, missä asennossa roottori on. Tämä onnistuu erillisellä anturilla tai mittaamalla käämien tuottamaa BEMF:a. Alku tilanteessa ohjainlaitteen tarvitsee tietää, missä asennossa roottori on jotta moottori lähtisi pyörimään haluttuun suuntaan. Tämä voi joissain tapauksissa näyttää siltä, että moottori epäröisi, ennen kuin se lähtee pyörimään, jos ohjainlaite ei tiedä moottorin asentoa.

Harjattomia tasavirtamoottoreita on kahta perustyyppiä, sinimuotoisia- ja puolisuunnikamoottoreita. Nimeäminen juontuu BEMF:stä, puolisuunnikkaalla se on puolisuunnikasaallon muotoista ja sinimuotoisella siniaallonmuotoista. Puolisuunnikamoottorissa ohjaus onnistuu päälle pois -menetelmällä mutta sinimuotoisessa moottorissa ohjauksen pitää tuottaa siniaaltoja. Puolisuunnikamoottorissa ohjaus on suorakulmamuotoista, mutta jos virran ja jännitteen aaltomuoto ei ole ideaalinen kanttiaalto, on vääntö epätasaisempaa. Sinimuotoisessamoottorissa taas ei aaltomuodon epäideaalisuus aiheuta suurta väännönepätasaisuutta. Sinimuotoisenaallon tuottaminen on melko monimutkaista ja moottori vaatii tarkan asentoanturin toisin kuin puolisuunnikamoottorissa, jonka ohjaus on verrattain yksinkertaista eikä vaadi kovin tarkkaa asentoanturia. [10, s. 354.]

Harjaton moottori on mekaaniseltaan rakenteeltaan hieman yksinkertaisempi kuin harjallinen, mikä tekee siitä pitkäikäisemmän ja kestävämmän. Harjaton moottori tarvitsee kuitenkin huomattavasti monimutkaisemman ohjauksen kuin harjallinen.

### 3.2.3 Reluktanssimoottori

Reluktanssimoottori on myös harjatonmoottori ja on rakenteelta melko samanlainen, mutta siinä ei käytetä kestopagneetteja. Roottori on pelkästään rautaa, joka on muotoiltu tähden muotoon. Staattorissa ovat kelta, keloja on aina kaksi enemmän kuin roottorin sakaroita. Kuvasta 12 käy ilmi reluktanssimoottorin rakenne. Mitä enemmän keloja, sen tasaisempi on vääntö.



Kuva 12. Reluktanssimoottorin rakenne [11]

Kaksi kela vastakkain muodostavat käämin. Kelat toimivat sähkömagneettien tavoin. Yhteen käämiin johdetaan virtaa, saadaan roottorin sakarat kääntymään kyseisin kelaparin suuntaisesti. Prosessi toistetaan toisella kelaparilla, jotta pyöriminen jatkuisi. Reluktanssimoottorissa ei tarvita kahta magneettikenttää ja sekin, joka luodaan, pysyy paikoillaan nähden käämeihin nähden. BEMF:ä ei siis muodostu, koska käämi ei liiku magneettikentässä. Koska BEMF:n ei muodostu, voidaan saavuttaa korkeampia pyörimisnopeuksia kuin harjattomassa moottorissa.

Reluktanssimoottorin ohjaus on samantyyppinen kuin harjattomassa moottorissa: käämeihin johdetaan virtaa oikeassa järjestyksessä. Tämä edellyttää

roottorin asennon tunnistamista anturilla. Rakenteeltaan reluktanssimoottori on hieman kestävämpi, eikä siinä tarvita kestopagneetteja. Moottorinohjain on kytkennältään myös hieman yksinkertaisempi, koska virran tarvitsee kulkea käämissä vain yhteen suuntaa.

### 3.2.4 Induktiomoottori

Induktiomoottori on yleisin vaihtovirtamoottori, ja se tunnetaan paremmin nimellä oikosulkumoottori. Induktiomoottorissa staattorikäämeihin syötetään vaihtovirtaa, joka saa aikaan pyörivän magneettikentän. Tämä magneettikenttä leikkaa rottorissa olevia johdinsauvoja, jotka on päistään oikosuljettu keskenään. Näin rottoriin indusoituu sähkövirtaa ja muodostaa magneettikentän rottoriin, joka pyrkii seuraamaan staattorin pyörivää magneettikenttää. Rottori pyörii hitaammin kuin staattorin magneettikenttää, jotta induktiota tapahtuisi; tätä sanotaan luistoksi. Koska rottori pyörii eri nopeudella kuin magneettikenttä, on induktiomoottori asynkroninen moottori, kun taas edellä mainitut moottorit ovat synkronisia, koska niiden rottorit pyörivät magneettikentän nopeudella. Yksinkertaisimmillaan induktiomoottorin rottorin rakenne muistuttaa hiiren juoksupyörää, kuten kuvasta 13 voidaan nähdä.



Kuva 13. Induktiomoottorin yksinkertaistetturakenne [12]

Käytännössä rottorin häkin sisällä on rautaydin. Moottorin hyötysuhde riippuu luistosta: mitä suurempi luisto, sitä pienempi hyötysuhde ja päinvastoin. Jos rottori saavuttaisi jostain syystä magneettikentän pyörimisnopeuden, ei induktiota tapahtuisi ja rottorin pyöriminen hidastuu, jolloin induktio pääsee taas tapahtumaan, kun rottori pyörii hitaammin kuin magneettikenttää. Induktiomoottorit on usein suunniteltu tasanopeusmoottoreiksi, mutta nopeutta voidaan säätää useilla eri tavoilla, muun muassa vaihtovirran taajuudella.

Rakenne induktiomoottorissa on yksinkertainen, huoltovapaa ja kestävä eikä niissä ole tarvetta kestopagneeteille.

### 3.2.5 Soveltuvuus

Moottoria valitessa pitää huomioida moottorin huippu- ja nimellisteho ja vääntö. Myös näiden kuvaajat kierrosluvun, jännitteen ja virranfunktiona olisi hyvä olla olemassa sekä huippuarvot jännitteestä ja virrasta. Moottorin massa ja roottorin inertia ovat myös tärkeitä tietoja sekä moottorin fyysiset mitat. Moottorin jäähdytyksen tarve on oleellinen ja se, miten jäähdytys tai sen puute vaikuttavat suoritusarvoihin. Hinta tietysti vaikuttaa moottorin valintaan riippuen budjetista ja siitä, miten pitkään moottoria aiotaan käyttää. Hyötysuhdetta katsoessa pitäisi huomioida eri moottorityyppien vaatiman ohjaimen hyötysuhde. Hyötysuhde riippuu moottorityypistä ja valmistajasta, ja kuten aiemmin mainittiin, ovat edellä mainittujen moottorityyppien hyötysuhteet 10 prosenttiyksikön sisällä.

Kaikilla edellä mainituilla moottoreilla saadaan auto liikkeelle ja hyvällä kokonaisuudella kulkemaankin riittävän nopeasti, riippuen tietenkin hieman tavoitteista. Paras mahdollinen olisi täysin tarkoitukseen suunniteltu moottori, mutta se on myös kallein mahdollinen. Moottori on kuitenkin vain yksi osa kokonaisuutta, ja sen valinnassa pitää huomioida, miten se vaikuttaa muihin komponentteihin ja sitä myöten kokonaisuuteen.

## 3.3 Akut

Akkuja on käytetty jo 1800-luvulta asti virtalähteenä erilaisille sähkölaitteille, joissa ei voida tai haluta käyttää verkkovirtaa. Akkuja ei pidä sekoittaa pattereihin tai paristoihin, jotka ovat kertakäyttöisiä. Kun paristo kerran on luovuttanut energiansa, ei sitä voida ladata uudestaan toisin kuin akkuja. Englanninkielessä ei tällaista erottelua ole, vaan patterit ja paristot ovat primary batteryjä ja akut ovat secondary batteryjä. Akkujen tarkoitus on varastoida sähköenergia, joka tarvitaan auton liikuttamiseen. Akut ovat tällä hetkellä sähköauton haastavin komponentti, koska ne vievät eniten tilaa, ovat painavampia ja joskus kalleimpia yksittäisiä osia, mitä sähköautossa voi olla.

Akkujen toiminta perustuu sähkökemialliseen reaktioon. Akut koostuvat kennoista, joissa sähkökemiallinen reaktio tapahtuu. Kenno koostuu kahdesta elektrodista ja niiden välisestä elektrolyytistä. Toinen elektrodeista on katodi

ja toinen anodi. Kun kennon kytketään sähköiseen kuormaan, alkaa katodissa pelkistymisreaktio, eli se ottaa vastaan elektroneja. Nuo elektronit tulevat kennoon kytketyn kuorman kautta anodilta, joka luovuttaa niitä hapettumisreaktion myötä. Tällaista kennoa sanotaan galvaaniseksi. Kenno kytketään virtapiiriin, tuolloin katodin potentiaali on positiivinen ja anodi negatiivinen. Kun kennoon syötetään sähkövirtaa ulkoisella virtalähteellä, tapahtuu reaktio päinvastoin, jolloin sitä sanotaan elektrolyysiksi, ja myös elektrodien varaukset vaihtuvat. Käytännössä prosessia ei voida toistaa loputtomiin, koska kennon materiaaleissa tapahtuu pieniä palautumattomia muutoksia.

Jännite, jonka kenno tuottaa, riippuu käytetyistä materiaaleista. Käytännössä kennojännitteet akuissa ovat jääneet alle neljän voltin. Myös kennon kyky antaa ja vastaanottaa virtaa riippuu materiaaleista. Kennon fyysiseen kokoon vaikuttaa energiatiheys, joka määrää, kuinka paljon energiaa tiettyyn tilavuusmäärään kennoa saadaan varattua. Jotta haluttu jännite saadaan akusta, kytketään kennoja sarjaan ja riippuen kennojen koosta kytketään niitä tarvittaessa rinnan kapasiteetin kasvattamiseksi. Akun jännite on kuitenkin eri kuin kennojen jännite, etenkin kuormitettaessa akkua. Tämä johtuu akun sisäisestä resistanssista, joka muodostuu akun sisäisistä liitoksista ja johtimista sekä kennojen materiaaleista ja koostumuksesta. Akun varaustila, lämpötila ja ikä vaikuttavat myös sisäisen resistanssin suuruuteen. Virran kasvaessa jännite laskee, koska resistanssi pysyessä lähes vakiona Ohmin lain mukaisesti (kaava 10).

$$U = I \cdot R \quad (10)$$

$U$  = jännite

$I$  = virta

$R$  = resistanssi

Sisäisen resistanssin on syytä olla siis mahdollisimman alhainen kennoissa ja akuissa. Akulla on myös hyötysuhde eli kuinka paljon siihen ladatusta energiasta voidaan käyttää. Akun purkamisnopeus vaikuttaa akun varaukseen. Akuille ilmoitetaan kapasiteetti  $C$  ampeeritunneissa eli Ah, jolla tarkoitetaan kuin monta ampeeria akku voi teoriassa luovuttaa tunnin aikana. Mutta käytännössä tämä ei kuitenkaan toimi, vaan usein akuille ilmoitetaan, mil-

lä purkausvirralla saavutetaan ilmoitettu kapasiteetti. Esimerkiksi 30 Ah:n akulle on purkausvirraksi merkitty 2C joka on 60 Ah. Akkua voidaan siis purkaa 60 Ah:n virralla, jolloin sillä saavutetaan 30 Ah:n kapasiteetti. Jos akkua puretaan nopeammin, laskee kapasiteetti. Vastaavasti jos sitä puretaan hitaammin kasvaa kapasiteetti. [4, s. 25.]

Akkuja valittaessa täytyy tietää tarvittava jännitteen-, virran ja energian tarve. Eri vaihtoehtojen vertailuun on hyvä selvittää myös ominaisenergia Wh/kg ja ominaisteho W/kg. Akun käyttöikään vaikuttaa latausten ja purkauksen määrä sekä se miten tyhjäksi akku puretaan kunnes sitä ladataan. Näiden kertojen tai kiertojen määrä on myös oleellinen tieto akkujen valinnassa. Seuraavaksi käsitellään yleisimpiä akkutyppejä ja niiden ominaisuuksia sekä soveltuvuutta FSE-autoon.

### 3.3.1 Lyijyakku

On vanhimpia akkuja ja yleisin akkutyyppi, jota käytetään kulkuneuvoissa. Lyijyakkuja on käytetty jo 100 vuoden ajan. Lyijyakun elektrodit ovat nimensä mukaan lyijyä ja elektrolyytti on noin 34 -prosenttista rikkihappoa. Ladataan positiivinen elektrodi on lyijyä ja negatiivinen elektrodi lyijyoksidia. Kun akusta otetaan virtaa eli sitä puretaan, muuttuvat kummatkin elektrodit lyijysulfaatiksi ja elektrolyytti laimenee lähes vedeksi. Kennojännite on noin 2 voltia, ja autojen akuissa on 6 kennoa. Lyijyakun energiatiheys on melko matala, mutta sen tehoteho on puolestaan melko korkea, ja on siksi suosittu erityisesti erilaisissa ajoneuvoissa sekä varavirtalähteissä. Myös matala hinta ja pitkä elinkaari on pitänyt lyijyakkujen suosion korkealla. Lyijyakku on hyvin edullinen mutta erittäin raskas vaihtoehto matalan energiatihedensä vuoksi. Tämän takia ne eivät ole läheskään paras ratkaisu FSE-autoon.

### 3.3.2 Nikkeli-metallihybridiakku

On puolestaan yleisimpiä, akkuja joita käytetään kannettavissa laitteissa ja kodin elektroniikassa. Esimerkiksi ladattavat AAA- ja AA-paristot ovat usein NiMH-akkuja. NiMH-akkujen positiivinen elektrodi on nikkelihydroksidi ja negatiivinen elektrodi on metalliseos, joka on kyllästetty vedyllä. Elektrolyytinä toimii kaliumhydroksidi, ja kennojännite on noin 1,2 voltia. Negatiivisessa elektrodissa käytettyjä metalliseoksia on kahdenlaisia,  $AB_5$ , joka koostuu lantaanista ja nikkelistä, sekä  $AB_2$ , jossa on titaania ja zirkoniumia. Jälkimmäi-

sellä saadaan suurempi kapasiteetti, mutta  $AB_5$  on suositumpi, koska se on vakaampi ja säilyttää varauksen paremmin. [13, s. 388.]

Koska nikkeli on kevyempää kuin lyijy, on sen energiatiheys huomattavasti parempi. NiMH-akut voivat saavuttaa yhtä suuren tehotiheyden kuin lyijy-akut. NiMH-akkujen voidaan ladata nopeasti, mutta jos siinä ei olla huolellisia, niin saattaa se aiheuttaa eksotermisen reaktion. NiHM-akut ovat kalliimpia kuin lyijyakut mutta halvempia kuin Lithiumakut. Ne soveltuvat paremmin FSE-auton kaltaisiin sovelluksiin, ja niitä on käytetty muun muassa Toyotan Prius- ja Hondan Insight-hybridiautojen akkuina. Näistä syistä NiMH-akku on varteenotettava vaihtoehto, kun tasapainotellaan kustannusten ja auton painon välillä.

### 3.3.3 Litium-akut

Litium on metalleista kevein ja sähkökemialtaan akuksi erittäin hyvä materiaali, jolla voidaan tuottaa korkea kennojännite, 3,7 voltia. Tämä johtaa korkeaan energiatihelyteen ja ominaisenergiaan. Litiumakut ovatkin melkein korvanneet NiMH-akut muun muassa mobiililaitteissa, kuten matkapuhelimissa ja kannettavissa tietokoneissa. Yleisimpiä litiumakut ovat litiumioniakku ja litium-polymeeriakku.

Litium-ionikennossa katodi on koboltti- tai mangaanioksidia, anodi on grafiittia, johon on seostettu litiumia, ja elektrolyytti on orgaaninen liuos, jossa on litiumkationit pääset liikkumaan. Näiden lisäksi katodista kerätään virta positiiviseen virrankeräyslevyyn, joka on alumiinia, ja vastavuoroisesti anodilla on negatiivinen virrankeräyslevy joka on kuparia. Litiumkationien muutokset siirtymiset katodista anodiin ja päinvastoin aiheuttaa hyvin pieniä muutoksia ja näin ollen pidentää käyttöikää. [14, s. 52.]

Litium-polymeerikennossa elektrolyytti on kiinteä ionijohtava polymeerikalvoa. Tällainen ratkaisu lisää kennon varmuutta ja mekaanista kestävyyttä, kun ei ole kaasuuntumis- tai vuotoriskiä. Akuista voidaan tehdä myös hyvin ohuita, minkä takia ne ovat nykyään suosittuja matkapuhelimissa ja kämmen-tietokoneissa. Tällaisessa ratkaisussa sisäinen resistanssi on korkea, koska kuivat elektrodit eivät johda kovin hyvin sähköä, mikä johtaa heikkoon tehosiheyteen. Lisäämällä geelimäistä elektrolyyttiä saadaan sisäistä resistanssia pienennettyä ja tehosiheyttä parannettua. Tällaisia kennoja sanotaan hybridikennoiksi. [14, s. 59.]

Yksi tuoreimmista litiumakuista ovat litiumrautafosfaattiakut eli  $\text{LiFePO}_4$ -akut jossa katodimateriaalina käytetään rautafosfaattia. Rautafosfaattihiukkasissa ioni absorboituu nopeammin, mikä mahdollistaa litiumioniakkuja nopeamman latauksen. Myös käyttöikä pitenee, koska ionit pääsevät liikkumaan nopeammin ja aiheuttavat näin vähemmän pysyviä muutoksia elektrodihin.  $\text{LiFePO}_4$ -akut ovat myös paljon vakaampia kuin kobolttipohjaiset litiumakut, koska niissä ei tapahdu eksotermistä reaktiota, mikä mahdollistaa niiden käytön korkeammissakin lämpötiloissa. Rautafosfaatti kuitenkin johtaa heikosti virtaa, ja näin ollen  $\text{LiFePO}_4$ -akut eivät pysty luovuttamaan suuria virtoja, mikä laskee ominaistehoa. [14, s. 68.]

Litiumakut ovat ominaisuuksiensa puolesta, suuren ominaisenergian vuoksi, paras vaihtoehto. Se on kuitenkin suhteellisen nuori tekniikka, ja koska sitä kehitetään jatkuvasti, niin on hinta kalliimpi kuin NiMH-akuissa. Litiumakut eivät kestä kovin hyvin ylijännitettä latauksessa, ja ne vaativat usein valvontapiirin, joka tasapainottaa varauksia eri kennon välillä.

### 3.3.4 Kondensaattori

Edellä mainituilla akuilla ei välttämättä saavuteta riittäviä ominaistehoa etenkin FSE-auton tyypillisessä käytössä, jossa maksimitehon tarve hetkittäin voi olla hyvinkin suurta. Samanlaista tarvetta esiintyy muun muassa henkilöautojen äänentoistossa. Kun vahvistin hetkittäin ottaa suuria määriä virtaa auton akulta ja laturilta, pääsee jännite laskemaan. Tätä korjataan lisäämällä virtapiiriin kondensaattori, joka pystyy luovuttamaan hetkellisesti paljon virtaa jännitteen laskematta.

Tavallinen kondensaattori koostuu kahdesta elektrodista, joiden välillä on eriste. Kondensaattori kytketään virtalähteeseen, varautuvat elektrodit vastakkaismerkkisillä varauksilla. Kun virtalähteen jännite laskee alle kondensaattorin varatun jännitteen, purkautuu kondensaattorien elektrodien varaus virtapiiriin. Kondensaattorissa on suuri kapasitanssi, eli se vastustaa jännitteen muutosta. Kapasitanssin yksikkö on faradi.

Kondensaattorin konseptia on kehitetty sähköautojen tarpeeseen paremmin sopivammaksi. Idea on sama: antaa hetkellisesti tehoa. Näitä kondensaattoreita kutsutaan super-, ultra- ja kaksoiskerroskondensaattoreiksi. Näissä kapasitanssia on pyritty kasvattamaan kasvattamalla elektrodien pinta-alaa ja ohentamalla eristeväliä. Pinta-alaa on onnistuttu kasvattamaan käyttämällä



aktiivihiiltä, joka on hyvin huokoista ja karkea mikroskooppisella tasolla, jolloin pinta-alakin on suuri jo ohuessa kerroksessa. Aktiivihiili on elektrodien välissä muodostaen samalla eristevälin sähköisen kaksoiskerrosilmiön myötä. Näin saadaan suuri kapasitanssi hyvin pieneen tilaan. Superkondensattorien rajoittavana tekijänä on jännitteenkesto, joka ei voi olla kovin suuri ohuen eriste välin takia. [15, s.12]

### 3.3.5 Akkujen valmistajat

Akkutekniikka on kehittynyt viime vuosikymmeninä huimasti ja nykyään niiden kysyntä vain kasvaa sähköajoneuvojen myötä. Alalla on monenlaisia yrityksiä, jotka tarjoavat tuotteita pelkistä kennoista valmiisiin akkupaketteihin. Paras vaihtoehto olisi täysin tarkoitukseen suunniteltu akku kennojaan myöten. Tämä kuitenkin erittäin kallista ja vaatisi tiivistä yhteistyötä kenno- ja akkuvalmistajan kanssa. Valmis akkupaketti olisi luultavimmin edullisin vaihtoehto, mutta tässä tapauksessa energiamäärä saattaa ylittyä tarvittavasta, mikä johtaa ylimääräiseen painoon. Oman akkupaketin rakentaminen valmiista kennoista on hyvä kompromissi hinnan ja suorituskyvyn väliltä. Nyt tarkastellaan joitakin potentiaalisia tuotteita, joita on tarjolla.

Kennoja on kahta eri perustyyppiä: sylinterimäisiä, kuten perinteiset sormiparistot, ja litteitä (prismatic), joita näkee muun muassa matkapuhelimissa. Litium- ja nikkelikennoja voidaan kumpiakin valmistaa edellä mainitunlaisina. Sylinterimäisissä kennoissa elektrodit ja elektrolyytti on pinottu ja sitten käännetty rullalle. Pinossa kuitenkin pitää olla vielä eristelevy, jotta elektrodit eivät koskettaisi toisiinsa rullassa. Rulla laitetaan sylinteriin, jonka päädyt yhdistetään elektrodeihin, ja niistä tehdään kennon miinus- ja plus-napa. Tällainen rakenne pitää kennon tiiviisti nipussa, eikä komponenttien välille pääse syntymään helposti rakoja, jotka heikentäisivät akun kapasiteettia. Sylinterimäiset kennot eivät kuitenkaan ole parhaita mahdollisia tilankäytön suhteen. Litteissä kennoissa komponentit on vain pinottu ja säilötty kuoriinsa. Näissä kennoissa ei välttämättä tarvita ylimääräistä eristekerrosta ja ne voidaan valmistaa lähes minkä muotoisiksi levyiksi tahansa. Käytännössä kuitenkin valmistetaan suorakaiteen tai neliön muotoisiksi levyiksi. Mutta litteäkennoon syntyy helpommin rakoja, jos sen kuori ei tarpeeksi paina nippua kasaan. Tällöin akkupaketin tai moduulin täytyy luoda puristusta kennoihin. Tilankäytön suhteen litteät kennot ovat tehokkaampia kuin sylinterimäiset.

A123 Systems on vuonna 2001 perustettu amerikkalainen yritys, joka on erikoistunut litiumrautafosfaattitekniikkaan. Yritys tarjoaa niin sanotusti hyllyltä kolmea eri kokoista standardin mukaista sylinterimäistä kennoa, yhtä litteää kennoa ja valmista akkupakettia, joka on tarkoitettu Toyota Priuksen seinästä lataus muunnokseen. Suurin sylinterimallinen 32113-kenno ja litteä 20 Ah:n kenno ovat lupaavimmat vaihtoehdot. Litteä kenno on paketoitu ohueen alumiinikuoreen ja vaatinee mahdollisessa akkupaketin rungolta puristusta.

GS Yuasa on kahden japanilaisen yrityksen fuusiosta syntynyt litiumioniakkujen ja kennojen valmistaja. Yritys valmistaa kennoja lentokone-, avaruus-, sotilas- ja ajoneuvoteollisuuden tarpeisiin. Kennot ovat melko järeän näköisiä, hyvin koteloituja, ja niissä on hyvät terminaalit, joihin on helppo kiinnittää johtimet. Ominaisuuksiltaan parhaat kennot on tarkoitettu lentokoneisiin ja satelliitteihin, mutta niiden hintakin voi olla korkea. Autoihin tarkoitettu LEV50-kennoa käytetään myös Mitsubishin MiEV-sähköautossa, joten hinta voi olla hieman kohtuullisempi.

LG Chem kuuluu eteläkorealaiseen LG:hen ja valmistaa muun muassa akkuja. Tuotevalikoimaan kuuluu lähinnä pieniä, kuluttajaelektroniikkaan suunnattuja kennoja, joskin niitä on laaja valikoima. Yrityksellä on tarjota kahta hieman suurempaa litteää kennoa, samantyyppisesti paketoituja kuin A123 Systemsin vastaava. Kennot ovat litiumpolymeerikennoja 10 Ah:n ja 6 Ah:n kapasiteetilla.

European Batteries on suomalainen akkuvalmistaja, joka tarjoaa tuotteitaan sähköajoneuvoihin. Yritys tarjoaa valmiita akkumoduuleja 1,1 kWh:sta aina 4,3 kWh:iin, kennot ovat LiFePo<sub>4</sub>-kennoja. Moduuleita on neljää eri kokoa, 8, 16, 24 ja 32 kennoa sisältäviä. Moduulin kapasiteetti ja jännite ovat valittavissa sekä moduuleihin on saatavissa valvontajärjestelmä.

### 3.3.6 Akkupaketti

Kennot on paketoitava akkupakettiin (kts. s. 15). Akkupaketin pitää sisältää valvontajärjestelmä, joka ainakin tasapainottaa kennojen potentiaali eroja ja varauksia sekä valvoo akuston lämpötilaa. Sarjaan kytkettyjen kennojen välillä syntyy potentiaalieroja, koska niiden navat eivät ole keskenään samassa potentiaalissa. Puolestaan rinnankytketyt kennot ovat samassa potentiaalissa, ja eikä niiden välille pääse muodostumaan jännite-eroja sen takia. Valvontajärjestelmän keräämät tiedot voidaan lähettää auton tiedonkeruulle

jonka, kautta kuljettajaa voidaan varoittaa, jos raja-arvot ylittyvät, ja tarvittaessa valvontajärjestelmä avaa akkukotelon eristysreleet. Tietojen tallentaminen auttaa myös seuraamaan akkujen kulumista ja käyttäytymistä eri kuormitustilanteissa.

Akkupaketti pitää sääntöjen mukaan olla tukevasti kiinni autossa. Akkupaketteja saa myös olla useampia, kunhan ne ovat mitoiltaan samanlaisia. Useampi akkupaketti mahdollistaa tehokkaamman testauksen, kun autoa ei tarvitse ladata välillä. Akkupaketin irrottaminen ja kiinnittäminen ei kuitenkaan saa viedä kolmannestakaan siitä ajasta, mitä niiden lataamiseen menee. Akkupaketin ei tarvitse olla helposti irrotettava, mutta nopeasti vaihdettava akku nopeuttaa testaamista. Se myös parantaa työturvallisuutta auton kanssa työskennellessä, kun akun voi helposti poistaa, laittaa syrjään turvallisesti paikkaan ja työskennellä auton kanssa ilman pelkoa korkeajännitteestä.

### 3.4 Moottorinohjainlaite

Akkujen ja moottorin välille tarvitaan laite, joka säätelee ja ohjaa sähkövirtaa akuilta moottorille sekä mahdollisesti päinvastoin. Yksinkertaisimmillaan se voi olla vain kytkin akun ja moottorin välillä, jolloin moottori pyörisi aina, kun kytkin olisi kiinni. Tuollainen ei kuitenkaan olisi käytännöllinen ratkaisu FSE-auton kaltaisessa sovelluksessa, jossa esiintyy erilaisia kuormitus- ja nopeustilanteita. Myös moottorin tyyppi vaikuttaa ohjainlaitteen vaatimuksiin, ja edellä mainittu ratkaisu sopisi vain harjalliseen tasavirtamoottoriin. Muissa moottorityypeissä kytкимиä tarvitaan enemmän kuin yksi ja niiden kytkeytymistä pitää pystyä ohjaamaan jopa mikrosekuntien tarkkuudella moottorin asennon mukaan. Nykyinen puolijohdetekniikka on mahdollistanut monimutkaiset ja joustavat ohjaukset isoimmillekin moottoreille.

Moottorinohjaus jakautuu kahteen eri osaan, kuten säännöissä on määritelty, ohjausjärjestelmään ja vetojärjestelmään. Vetojärjestelmä välittää niin sanotun voimavirran moottoreille, jolla ne saadaan pyörimään. Ohjausjärjestelmä ohjaa vetojärjestelmää kaasupolkimen muun muassa kaasupolkimen asennon mukaan eli kertoo, kuinka paljon moottoreilta halutaan vääntöä ja nopeutta. Vetojärjestelmä välittää näiden pyyntöjä vastaavan tehon moottorille tai moottoreille. Vertauskuvallisesti vetojärjestelmä ja sähkömoottori ovat polttomoottori apulaitteineen, joiden yhteistyöstä syntyy mekaaninen voima.

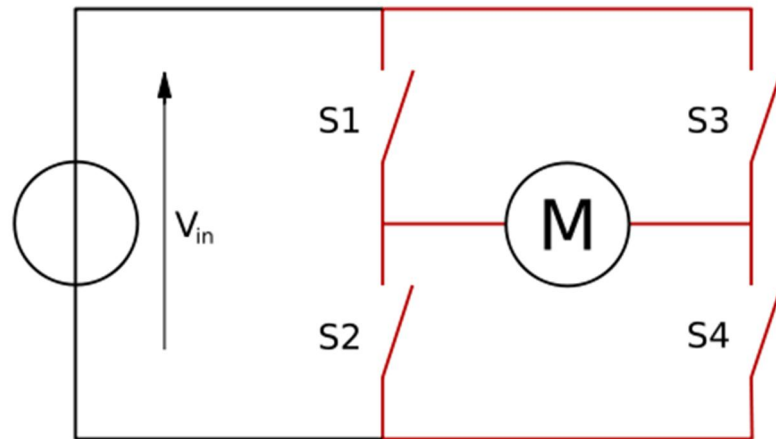
Ohjausjärjestelmä on polttomoottorinohjainlaite, joka ohjaa tuota mekaanisen voiman tuottoa. Tässä luvussa tarkastellaan joitakin kytkentöjä, joilla erilaiset moottorit saadaan pyörimään ja joihin ohjausjärjestelmä perustaa toimintansa.

#### 3.4.1 *Pulssinleveysmodulaatio-ohjaus*

Pulssinleveysmodulaatio-ohjaus, englanniksi Pulse Wide Modulation eli PWM, on yksinkertainen tapa saada eri jännitetaso tasavirtalähteestä kuten akuista. Siinä syötettävää virtaa katkotaan vakiotaaajuus suorakulma-aallolla. Kun taajuus on riittävän korkea, ei ohjattava kuorma ”huomaa” katkomista vaan ”näkee” vain tehollisen jännitteen. Tehollista jännitettä muutetaan muuttamalla suorakulma-aallosta päälle kytkeytymisaikaa; tätä sanotaan pulssisuhteeksi. Esimerkiksi jos jakson ajasta suorakulma-aallon pulssisuhde on 50 %, kytkin on puolet ajasta kiinni ja sitä myötä tehollinen jännite on puolet tasavirtalähteen jännitteessä. Tällainen ohjaus sopii yksinkertaisille tasavirtalaitteille kuten harjallinen tasavirtamoottori. PWM:ää voidaan hyödyntää myös tasavirran muuntamisesta sinimuotoiseksi, jonkalaista vaihtovirta usein on. Tässä tapauksessa taajuuden pitää olla melko korkea. Sini-aallon huipulla pulssisuhde on lähes 100 %, kun taas aallonpohjalla se on lähes nolla. Pulssisuhdetta siis muutetaan jatkuvasti, ja mitä suurempi PWM:n taajuus on verrattuna siniaallon taajuuteen, niin sitä puhtaampaa siniaalto on.

#### 3.4.2 *Invertteri*

Invertteri kykenee muuttamaan tasavirran vaihtovirraksi. Yleisin tapa toteuttaa invertteri on H-siltakytkentä. Sillä voidaan luoda yksivaiheista vaihtovirtaa, samanlaista kuin mitä tavallisesta pistorasiasta saadaan. Kytkentä muodostuu kahdesta sarjaan kytketystä kytkin parista, ja nämä parit on kytketty rinnan tasavirtalähteeseen. Parien välille on kytketty kuorma sitten, että kuorman toinen napa on kytketty yhden kytkinparin väliin ja toinen toisen kytkinparin väliin kuvan 14 mukaisesti.



Kuva 14. H-sillan yksinkertaistettu kytkentä [16]

Ensin suljetaan kytkimet S1 ja S4, jolloin virta pääsee kulkemaan kuorman läpi. Tämän jälkeen ne avataan ja kytkimet S3 ja S2 suljetaan, jolloin virta kulkee kuorman läpi vastakkaiseen suuntaan eli negatiivista jännitettä. Kuormalla on yleensä jonkin verran induktanssia, etenkin sähkömoottorin tapauksessa, jolloin se pyrkii vastustamaan virran muutosta, kun kytkimet avataan. Tämän takia jokaisen kytkimen rinnalle kytketään diodi estosuuntaan tasavirtalähteen positiiviseen napaan. Diodien kautta induktanssin aiheuttama virta johdetaan virtalähteeseen kun kytkimet avataan. Näin virta on vaihtovirtaa, mutta ei vielä lähelläkään sinimuotoista, jos kytkimiä vain kytketään vuoron perään päälle ja pois. Siniaaltoa varten hyödynnetään edellä mainittua PWM-ohjausta kytkimille, jolloin jännite saadaan nousemaan tasaisemmin ja vaihtovirrasta saadaan sinimuotoisempaa.

Vaihtovirtaa on yksivaiheisen lisäksi useampivaiheista. Yleisin näistä on kolmivaihevirta. Siinä on kolme eri siniaaltoa  $120^\circ$ :n vaihe-eron välein, muuten siniaaltojen tulisi olla identtiset. Invertterin rakenne on melko samanlainen, mutta siinä on kolme kytkinpari ja jokaisen kytkinparin väli on yhteen kytketty kuorman vaiheista. Kytkinten kytkentä järjestys on hieman erilainen kolmivaihevirralla, koska kolme kytkintä on yhtä aikaa kytkettynä. Kolmivaihevirralla saadaan oikosulkumoottori pyörimään. Tällaista kytkennällä syötetään virtaa myös harjattomalle tasavirtamoottorille.

Invertterissä ja PWM-ohjauksessa kriittisimmät osat ovat kytkimet, joilla virtaa ohjataan haluttuun suuntaan. Kytkentä nopeudet ovat edellä mainituissa sovelluksissa suuret ja kasvavat kytkentätaajuuden myötä. Mekaaniset kytkimet eivät kykene tarvittaviin nopeuksiin, joten niiden sijasta käytetään puo-

liijohdekytkimiä. Puolijohteilla ei myöskään pääse syntymään valokaarta, koska niissä ei ole mekaanisia kontaktoreja. Puolijohteillakin on kuitenkin kytkentäaika, eli aika kun puolijohde vaihtaa eristävästä johtavaan tilaan. Myös pois kytkentäaika pitää huomioida, koska se ei ole samansuuruinen. Mitä lyhyemmät nämä ajat ovat, sitä korkeammalla taajuudella voidaan puolijohdetta "ajaa". Mitä vähemmän aikaa kytkemiseen ja pois kytkemiseen menee nähden päällä- ja poisoloaikaan, sitä vähemmän sähkövirtaa hukkaantuu resistanssin kautta lämmöksi. Toisin sanoen hyötysuhde on parempi. Kytkentäaika on aina kuitenkin jonkinpitäinen, ja johtavassakin tilassa puolijohteella on resistanssia, joten lämpöä syntyy. Siksi riittävästä jäähdytyksestä on huolehdittava.

### 3.4.3 Ohjausjärjestelmä

Ohjausjärjestelmän kertoo vetojärjestelmälle kuinka, paljon mitäkin suuretta kultakin moottorilta halutaan kussakin tilanteessa. Ohjausjärjestelmä laskee nuo suuret antureilta ja ennalta määrätyistä arvoista. Yksinkertaisimmillaan ohjausjärjestelmään on kytketty potentiometri, jota käytetään kaasupolkimella. Kun poljinta ei paineta eivät moottorit pyöri eikä niissä ole vääntöä ja kun poljin on pohjassa, pyrkii vetojärjestelmä antamaan niin paljon virtaa kuin vain mahdollista, jotta moottoreilla olisi suurin mahdollinen momentti.

Koska olosuhteet muuttuvat, muuttuu myös pito renkaalla, joten momentti voi aiheuttaa pyörän luistamista erilaisissa olosuhteissa. Toisaalta kumilla on paras kitkakerroin pienellä luistolla, ja näin ollen parhaiten voimaa välittyy tiehen. Niinpä luiston kontrollointi on kaasupolkimen jälkeen seuraava ominaisuus ohjausjärjestelmässä. Luiston havaitsemiseen tarvitaan renkaiden pyörimisnopeus ja auton nopeus maahan nähden. Kun tiedetään renkaan säde, voidaan laskea, kuinka nopeasti renkaan pitäisi pyöriä kullakin nopeudella. Vertailemalla näitä tietoja voidaan havaita pyörän luisto. Auton maanopeus voidaan mitata mahdollisilta vetämättömältä akselilta, optisesti maanpinnasta tai suoraan vertailla vetämättömien pyörien nopeutta vetävien pyörien nopeuteen.

Jos jokaiselle vetävällä pyörällä on oma moottorinsa eivätkä vetävät akselit ole mekaanisesti yhteydessään toisiinsa, ei tarvita tasauspyörästä. Tämä siis jos käytetään vääntöohjausta. Jokaiselle pyörälle voidaan lähettää sama vääntömomentti pyyntö, jonka ne pyrkivät toteuttamaan. Pyörimisnopeudet asettuvat itsestään sopiviksi. Esimerkiksi jos pyörä olisi ilmassa ja renkaalta

pyydetäisiin huippuvääntö, kiihdyttäisi moottori rengasta niin kauan, kunnes jokin vastusvoima kasvaisi suuremmaksi kuin vääntö tai moottorin huippupyörimisnopeus tulisi vastaan. Näin ollen kaarreaajossa, jossa eripuolten pyörien pyörimisnopeus on erisuuruinen, ei tarvita erillistä ohjausta pyörille tai virtuaalista tasauspyörästä. Erillistä ohjausta ei tarvita auton kääntymisen kannalta, mutta sillä voidaan vaikuttaa vahvasti auton käyttäytymiseen.

Kun voidaan vaikuttaa erikseen vetäviin pyöriin, voidaan aiheuttaa momenttia auton pystyakselin ympäri. Tätä voitaisiin hyödyntää muun muassa tiukoissa käänöksissä. Kiihtyvyyssanturin ja luistonrajoituksen avulla voitaisiin autoon lisätä ajonvakautus. Esimerkiksi jos auto kääntyy liian nopeasti pystyakselinsa ympäri, aiheutettaisiin vetävillä pyörillä vastakkaissuuntaista momenttia vähentäen auton pyörähtämistä. Näitä ominaisuuksia pitäisi säätää ja testata kattavasti, jotta oikeat arvot säätöihin löytyvät, sekä kuljettajien pitää oppia hyödyntämään näitä ominaisuuksia.

### 3.5 Kokonaisuus

Kun tiedetään, minkä kokoinen moottori tarvitaan ja miten paljon akkuja tarvitaan mukaan sekä millä niitä ohjataan, voidaan alkaa hahmotella, miten ne saadaan autoon. Suunnittelussa ja komponenttien valinnassa pitäisi pyrkiä mahdollisimman kevyeen, koska kevyt auto on ketterämpi ja tarvitsee vähemmän energiaa liikuttamiseensa. Tietysti keveydessäkin pitäisi pysyä kohtuudessa eikä sen pitäisi vaikuttaa heikentävästi komponenttien toimintaan tai kestävyYTEEN. Vaihtoehtoja on monia, eikä suoraa vastausta ole olemassa siihen, mikä on paras. Tässä osiossa käsitellään miten, komponentit voidaan sijoitella ja kytkeä sekä miksi mikin vaihtoehto pitäisi valita tai olla valitsematta.

#### 3.5.1 Yksimoottorinen takavetoinen auto

Yksinkertaisimmillaan autossa on yksi moottori, jolla taka-akselia pyöritetään ja käytetään mekaanista tasauspyörästä. Haasteet akkujen, moottorin ja moottorinohjaimen suhteen riippuisivat moottorityypistä ja akuista. Niissäkin voitaisiin tämäntyyppisessä ratkaisussa päätyä yksinkertaisimpaan mahdolliseen. Miksi pitäisi mennä sieltä, missä aita on matalin? Kun auto on yksinkertainen, niin sen liikkeelle saaminen ja huoltaminen on nopeampaa. Tällöin jää enemmän aikaa auton testaamiselle ja kuljettajien harjoittamiselle jossa, sekuntien osia viilataan pois ajoista. Suorituskyky ei ole ehkä paras

mahdollinen, mutta mahdollisissa ongelmatilanteissa vian etsintä olisi nopeampaa ja säätöjä, jotka vaikuttavat auton kulkuun, olisi vähemmän. Kuten sanottu, ei suorituskyky olisi paras mahdollinen, eikä se välttämättä tarjoaisi tarpeeksi haasteita tekijöilleen.

### 3.5.2 *Kaksimoottorinen takavetoinen auto*

Kummallekin taka-akselin pyörälle on tässä vaihtoehdossa oma moottorinsa. Moottorit vaatisivat omat ohjaimensa, mutta niiden ei tarvitsisi olla kuin puolet vaadittavasta tehosta. Sillä voitaisiin parantaa suorituskykyä, kun eri puolen pyöriä voitaisiin ohjata tarvittaessa erikseen. Järjestelmän kehitys vaatisi enemmän aikaa ja sen toimintakuntoon saattaminen siihen pisteeseen, että autoa voidaan ruveta hienosäätämään. Kahdella moottorilla autosta voidaan luoda symmetrisempi ja painojakaumasta saadaan tasaisempi. Haastetta tämäntyyppisestä ratkaisusta löytyy, riippuen tietenkin tekijöiden tasosta.

### 3.5.3 *Neliveto*

Neliveto on parempi verrattuna yksiakselivetoiseen, jos ajoradan pito ei ole paras mahdollinen, esimerkiksi sateella FSE-autojen tapauksessa. Nelivedolla voitaisiin myös entisestään parantaa auton suorituskykyä muun muassa mutkissa, kun jokaiseen pyörään voitaisiin yksittäin vaikuttaa. Toisaalta useimmiten on kuivaa ja silloin ajoradan pito on riittävä takavetoisille autoille. Nelivetoinen on myös vaikea saada riittävän lähelle samaa painoa kuin saman tehoista takavetoista autoa, jotta painoeron voisi kompensoida yksittäisten pyörien ohjauksen tuomilla eduilla. Ohjausjärjestelmän toiminta olisi monimutkaisempi kuin kaksimoottorisessa takavedossa, jossa varmasti olisi riittämiin tekemistä ja testaamista jo ennen varsinaista auton testaamista. Neliveto on ensimmäiseen autoon ehkä hieman liikaa ja tulevaisuudessakin sitä pitäisi pitää optiona, jonka voi tarvittaessa poistaa tai lisätä autoon.

Yksi vaihtoehto on asentaa pienet moottorit etuakselin pyörille ja käyttää näitä pikemminkin jarruina kuin moottoreina. Jarrutusenergian voisi ottaa talteen, ja samalla yksittäisiä etupyöriä voitaisiin hidastaa tarpeen mukaan. Täyskiihdytys tilanteessa ne voisit tuottaa momenttia pyörille sen minkä pysyvät.



### 3.5.4 Moottorien sijoittelu

Sähkömoottorit ovat usein sylinterimäisiä kappaleita, joissa on valmistajasta riippuen enemmän tai vähemmän kiinnityspisteitä. Takavetoisessa autossa moottorit tietysti ovat kuljettajan takana. Koska moottorit ovat kohtalaisen painavia, tulisi niiden sijaita suurimmaksi osakseen kuitenkin taka-akselilinjan etupuolella. Tässäkin on kuitenkin huomioita vetoakselien kulma etenkin jos päädytään suoravetoiseen ratkaisuun. Takana on myös paljon muita auton olennaisia komponentteja, kuten pyörientuenta, iskunvaimentimet, jouset, kallistuksenvakaajat ja vetoakselit. Eräs ratkaisu olisi koteloida moottorit mahdollisuuksien mukaan uudestaan ja sijoittaa koteloon kiinnityspisteet muille tärkeille komponenteille. Moottorin tai moottoreiden ulostuloakselien ei ole pakko olla taka-akselin suuntaisesti, vaan ne voidaan asentaa myös kohtisuoraan taka-akseliin nähden. Näin välitys olisi hoidettava kulmavaihteella, joka on painavampi mutta huoltovapaampi ratkaisu kuin ketjuvälitys. Moottorin sijoittamisessa pitää huomioida etäisyys moottorinohjaimen, jotta virtajohtimet pysyisivät mahdollisimman lyhyinä. Moottorit olisi myös sijoitettava mahdollisimman alas, jotta painopiste pysyy matalalla.

Moottorien sijoittaminen pyörään itseensä rajoittaa vahvasti moottorien koko, koska vanteen eivät ole kovin suuria ja jousittamattoman massan määrä kasvaisi huomattavasti. Nelivetoisessa puolestaan etuakselinmoottorien pitäisi olla pyörän sisällä, mutta niiden ei tarvitsisi olla yhtä suuret kuin taka-akselin moottorit. Tämä koska etupyörien pitää olla kääntyvät, joten vetoakseli rakenne olisi painava etupyörien kääntyvyyden takia ja moottorit veisivät tilaa jalkatilasta. Jousittamaton massa joka tapauksessa kasvaisi edessä.

### 3.5.5 Akkujen sijoittelu

Koska akut koostuvat useammasta kennosta, voidaan niiden sijoittelulla vaikuttaa huomattavasti auton painojakaumaan ja sitä myöten käyttäytymiseen. Kennoja ei kuitenkaan kannata levitellä ympäri autoa jo senkin takia, että ne pitää koteloida ja kennojen väliset pitkät johtimet tuovat lisää painoa sekä lisäävät häviöitä. Akkupaketti tulisi sijoittaa mahdollisimman alas ja tasaisesti, niin että korkeajänniteliitännät olisivat mahdollisimman lähellä vetojärjestelmää, jotta johtimien pituus olisi mahdollisimman lyhyt.

Akkupaketin sijoittamisessa on otetta huomioon sen mahdollinen vaihtaminen. Koska akkupaketti tulee todennäköisesti painamaan kymmeniä kiloja,

sitä ei pitäisi nostaa etenkään, jos se halutaan vaihtaa kentällä. Myös rungon toteutuksesta ja muiden komponenttien sijoittelusta riippuen yläkautta vaihtaminen ei välttämättä ole mahdollista, ainakaan helposti ja nopeasti, jos akkupaketti sijoitetaan rungon sisälle. Sivuponttonit olisivat mainio paikka, mutta ne edellyttävät kaksinkertaisen sivutörmäyssuojan, joka pelkällä putkirungolla olisi melko raskas, komposiittirakenne olisi ehkä kevyempi. Rungon sisään sijoitetun akkupaketin irrottamisessa potentiaalinen vaihtoehto olisi laskea se alakautta maahan niin, että auto nostetaan ja akkupaketti jää maan tasalle mahdollisesti rullaavalla alustalle. Näin koska FS-autoja nostetaan joka tapauksessa muun muassa renkaiden vaihtamisen takia. Vaikka auto on raskaampi, on siihen useamman ihmisen helpompi tarttua. Akkupakettista pitää tehdä näin ollen tehdä riittävän matala, jotta nostokorkeus ei kasvaisi tarpeettoman suureksi, mikä on ollut aiemmissa FS-autoissa noin 30–40 senttimetriä.

#### 3.5.6 *Matalajännitejärjestelmä*

Muun muassa ohjausjärjestelmälle ja mahdollisille apulaitteille autossa tarvitaan matalajännitettä. Näille tarvitaan oma akku, jota ladataan vetojärjestelmän akuilla muuntajan kautta. Matalajännitejärjestelmässä ei välttämättä tarvitse olla 12 voltin järjestelmä, mutta mahdollisten pumppujen ja tuulettimien käyttöjännite on usein 12 voltia, etenkin jos ne on tarkoitettu autokäyttöön. Jännitteen valinnassa on huomioitava myös IMD:n ja AIR:n käyttöjännitteet. Erilaiset anturit voivat vaatia eri käyttöjännitteitä, mutta tiedonkeruujärjestelmä voi mahdollisesti tuottaa nuo jännitteet, riippuen tietenkin tiedonkeruujärjestelmästä.

#### 4 2010 FORMULA STUDENT ELECTRIC -KILPAILU

Formula Student Electric -kilpailu julkaistiin vuonna 2009 Saksan Hockenheimissa Formula Student Germany -kilpailussa. Ensimmäinen kilpailu pidettiin vuonna 2010 Saksan Hockenheimissa Formula Student Germany -kilpailun yhteydessä. Tapahtuma oli yhteinen, jossa kilpailtiin Formula Student Combustion (FSC)- ja Formula Student Electric (FSE) -autoilla. FSC-tiimejä oli paikalla 75 ja FSE tiimejä 15.

Aikaisempina vuosina kilpailun järjestelyjen taso oli korkea ja eikä siinä tehty poikkeusta tälläkään kertaa. FSC-tiimit saivat paikkansa Hockenheimringin varikkopilttuista kun FSE-tiimeille oli rakennettu oma katoksensa turvallisuuden ja selkeyden vuoksi. Järjestäjät olivat myös toimittaneet normaalien ensiapuvälineiden lisäksi paikalle neljä defibrillaattoria mahdollisten sähkötapaturmien vuoksi. Laitteiden käyttö jopa käytiin läpi lyhyesti tervetuliaistilaisuudessa. Paikalla oli myös ambulansseja ja ensihoitajia, ja tapahtumalla oli oma lääkärintsakin. Myös kilpailun sponsorit olivat myös vahvasti sähköteemalla esillä. He olivat tuoneet näytille sähköautokonseptejaan ja kokeiluautojaan. Myös ylimääräisiä palkintoja jaettiin FSE:hen liittyen useita kappaleita. Näitä olivat muun muassa Daimlerin "Best E-Drive Packaging " ja AMG:n "Best E-Dynamics and acceleration overall", joista jaettiin tuhannen euron palkintoja.

Kuten säännöt-osiossa mainittiin, eivät varsinaiset kilpailuosiot eronneet FSC:tä muuten kuin autojen voimanlähteinä. FSE-autot suorittivat SkidPadin ja kiihdytyksen FSC-autojen lomassa yhtä aikaa. Autocrossin ajoivat ensin FSE-autot, kukin vuorollaan ennen FSC-autoja. Mutta koska endurancessa autoja voi olla vain 3–4 kerrallaan radalla eivät järjestäjät pitäneet FSE-endurancea FSC-autojen kanssa samana päivänä, joka on perinteisesti kisan viimeinen päivä eli sunnuntai. Koska FSE-autot eivät juuri pitäneet ääntä päättivät, järjestäjät pitää FSE-endurancen lauantai-iltana, auringon jo laskettua. Rata valaistiin isoilla ja kirkkaina loistavilla heliumpalloilla, jotka toimivat yllättävän hyvin käytännössä. FSE-autojen hiljaisuuden takia järjestäjät pyysivät tiimeiltä toivekappaleita, joita soitettiin, kun auto aloitti suorituksensa.

## 4.1 Tiimit

Tässä osiossa esitellään joitakin varteenotettavimpia tiimejä ja analysoidaan hieman niiden autoja ja ratkaisuja. Tiedot perustuvat tiimien ilmoittamiin tietoihin ja lyhyisiin keskusteluihin tiimin jäsenten kanssa.

### 4.1.1 E40 Eindhoven

Eindhovenin auto on kehitysversio heidän vuoden 2009 polttomootoriautostaan. Runko on hiilikuitumonokokki, ja auto on ulkoisiltaan mitoiltaan melko kookas. Auton painon nousu polttomootoriauton 231,4 kilosta sähköauton 268,1 kiloon on pidetty melko kohtuullisena, vain 36,7 kilon nousu. Vetojärjestelmä on melko yksinkertainen, kaksi harjallista sähkömootoria, yksi kummallekin takapyörälle. Sähkömootorit ovat 30 kW:n Agnin 119-sarjan moottoereita. Akuiksi oli valittu LiPo-kennot, joita on yhteensä 78 kpl, joista 26 on kytketty sarjaan, joita on kolme rinnan. Akkuihin varastoitui 9 kWh energiaa. Moottorit välittävät hammasvälityksen kautta suhteessa 1:6 pyöriäle voimaa. Moottorinohjaimena käytettiin Kellyn KDH14651B:ti, mutta tiimi kertoi, ettei ollut tyytyväinen siihen.

### 4.1.2 E33 Zürich

Zürichinkin auto pohjautuu edellisvuotiseen FSC-autoon, jossa on takapuoli suunniteltu uudestaan. Konsepti on myös melko samanlainen kuin Eindhovenilla. Kaksi moottoria takapyörille, kummallekin pyörälle omansa, ketjuvälityksellä suhteella 1:5,3. Runko on hiilikuitumonokokki ja paino vain 227,2 kg joka oli kevein FSE-auto kilpailussa ja vain 26,4 kg:n lisäys FSC-autoon verrattuna. Auto on hyvin sopusuhtainen, ja yleisesti toteutus on siisti ja huoliteltu. Mootorit ovat Agnin 95R- harjalliset tasavirtamootorit, joiden harjoja tiimi oli hieman muunnellut vastaamaan paremmin tarpeitaan. Näitä ohjataan kahdella Kellyn KDH12101E-ohjaimella, joissa on vesijäähdytys. LiPo-akkuja on 8,7 kWh:n verran ja ne on sijoitettu auton sivuponttoneihin, maksijännite on 126 voltia.

### 4.1.3 E26 Stuttgart

Stuttgartin auto on muunnelma vuoden 2008 FSC-autosta, joka on teräsputkirunkoinen. Tiimi koostui enimmäkseen edellisvuoden FSC-tiimin jäsenistä, jotka olivat olleet mukana myös vuonna 2008. Auton takarunko pääkaaresta taaksepäin jouduttiin suunnittelemaan uudestaan sopivammaksi sähköiselle voimalinjalle. Sähkömoottoereita on kaksi, kummallekin takapyörälle omansa,

ja ne on asennettu pitkittäin, kulmavaihteen välityksen ollessa 1:5,5. Moottorit ovat AMK:n 47 kW:n DP7 harjattomat kestopagneettimoottorit, joita ohjataan AMK KW60 -inverttereillä. Auton paino on hyvin kohtuullinen, 277,5 kg ilman kuljettajaa, etenkin kun kyse on putkirunkoisesta autosta. Akkuja on 8,5 kWh:n verran ja suurin jännite 597 voltia. Kennoja on 150 sarjassa kolmena rinnankytkettynä pakettina, ja kennot on sijoitettu auton keskelle, niin että kuljettaja istuu osittain akkujen keskellä.

#### 4.1.4 E62 Zwickau

Zwickauun auto on sähköversio tiimin 2010 vuoden FSC-autosta eli kyse on putkirunkoisesta autosta. Autoon on suunniteltu neliveto jota ei kuitenkaan käytetty Saksan kilpailussa. Takana on kaksi kappaletta 30 kW itse suunniteltuja harjattomia kestopagneettimoottoria kummallekin pyörälle, jotka on välitetty pyörille ketjulla 1:4,92-suhteella. Etupyörille on suunniteltu napamoottoreita, jotka ovat 6,5 kW:n Siemensin 1FE1 harjattomat kestopagneettimoottorit planeettavaihteistolla 14,4-välityksellä. Näitä moottoreita ohjataan Siemensin S120-ohjaimilla, jotka on vesijäähdytetty. Auton massa ilman kuljettajaa on 251,5 kg, joka hyvä lukema putkirunkoiselle autolle. Akkuja on 5,9 kWh:n tunnin verran niin että 100 kennoa on sarjassa neljänä rinnan kytkettynä pakettina. Näin ollen suurin jännite autossa on 370 voltia.

## 4.2 Tulokset

Paikalle tulleista autoista läpäisi katsastuksen ja pääsi ajamaan 8 autoa, joista 7 pääsi endurancen starttiin asti. Näistä 7 enduranceen startanneista autoista 3 pääsi maaliin järjestyksessä Stuttgart, Eindhoven ja Graz. Kaikki tiimit suorittivat staattiset osiot. Kokonaiskilpailun voitti Stuttgart noin 880 pisteellä, lähes sadan pisteen erolla toiseksi tulleeeseen Eindhoveniin. Stuttgart voitti kaikki ajo-osiot, energiatehokkuutta lukuun ottamatta sekä presentaation. Zürich voitti desingin, toiseksi tuli Zwickau ja kolmas oli Eindhoven. Kustannuslaskelman eli Cost Eventin voitti Bratislava jonka auto oli hyvin pelkistetty, mutta valitettavasti he eivät läpäisseet katsastusta.

Endurancessa yllättävän moni keskeytti, vaikkakin joissakin tapauksissa keskeytyksen syy oli mekaaninen kuten Zwickauilla, kun heidän jousitukseltaan petti työntötanko edestä. Muutamassa tapauksessa akuissa ei vain riittänyt virtaa, ja yhdessä tapauksessa kylmäjuotos BMS:ssä sammutti auton kulun aika ajoin. Tiimit olivat päässeet testaamaan ennen kilpailua vaihtelee-

vasti, esimerkiksi Stuttgart oli saanut autonsa kunnolla ajoin muutama päivää ennen kilpailua, mutta Zürich oli ehtinyt testata jo pari kuukautta ennen kilpailua. Tosin Stuttgartilla oli samat kuljettajat ja alustageometriat kuin vuonna 2008, jolloin he olivat myös nopeimpia. Mitään suurempia vaaratilanteita ja vahinkoja ei tietävästi esiintynyt kilpailun aikana ja järjestäjät olivat tyytyväisiä suoritukseensa, joskin parannettavaa aina löytyy. Vuoden 2011 kilpailuun FSG:ssä on varattu 30 paikkaa FSE-autoille ja moni FSC-tiimi on ilmoittanut kiinnostuksesta toteuttaa FSE-auto.

## 5 YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT

FSE tarjoaa paljon uusia haasteita FS-kilpailuihin jo pelkästään auton suunnittelun ja toteutuksen kannalta kokeneellekin tiimille. Tässä työssä on melko pintapuolisesti käsitelty sähköisen vetojärjestelmän komponentteja, joista jokaisesta olisi aiheutta useampaankin yksittäiseen insinöörityöhön, etenkin sähkö- ja säätötekniikan puolelta.

Kuinka työn alussa määritellyt tavoitteet sitten saavutettiin? Säännöt pääosin käytiin melko tarkasti läpi, ja vaikka ne muuttuvatkin hieman ovat muutokset pikemmin tarkennuksia ja lisäyksiä kuin varsinaisia muutoksia. Jokaisen tiimin jäsenen pitäisi lukea itse säännöt ja ymmärtää ne, mutta tässä työssä tehty selvitys auttaa hieman tuossa ymmärtämisessä. Entä miten hyvin auton suoritusarvo vaatimukset selvitettiin? Perusteet sekä merkittävimmät tekijät jotka niihin vaikuttavat, selvitettiin. Näistä koottiin simulaatiot 75 metrin täyskiihdytykselle ja endurancelle, joita voidaan pienillä muutoksilla käyttää simuloimaan erilaisia autoja ja tiedonkeruun keräämiä nopeustietoja. Tuloksiin vaikuttavat paljolti alkuarvot ja niiden tarkkuus. Näillä simulaatioilla ja lähtöarvoilla saavutettiin suuntaa antavia tuloksia, joita endurancen osalta FSE-kilpailun tulokset tukivat.

Sähkö- ja sähköautotekniikka, moottorit, akut ja ohjainlaitteet esiteltiin melko pintapuolisesti ja yksinkertaisesti. Tarkoituksena olikin hieman aukaista kyseisiä asioita mekaaniseen suunnitteluun keskittyneelle henkilölle. Onnistumista on vaikea siltä osin arvioida, mutta kaikki oleellinen on pyritty selittämään. Pohdinnat kokonaisuuden toteuttamisesta ovat vain eräitä vaihtoehtoja monista mahdollisista ratkaisuista.

Tässä työssä ei ollut tarkoitus varsinaisesti määritellä, kannattaako lähteä tekemään FSE-autoa FSC-auton sijasta, vaan hieman kartoittaa mitä se vaatisi. FS-auton suunnitteluun, toteuttamiseen ja testaamiseen ylipäänsä on vähän aikaa, yleensä alle vuosi, ennen kilpailua jos halutaan kilpailla vuosittain uudella autolla. FSE-auton suunnittelu etenkin vetojärjestelmän ja akuston osalta pitäisikin aloittaa hyvissä ajoin ennen varsinaisen auton suunnittelua, jos halutaan menestyä jossain määrin ensimmäisenä vuonna. Kuten tämän vuoden kilpailu osoitti, eivät hyvinkään valmistautuneet tiimit päässeet maaliin asti. Mutta mitä pidempään autoa voidaan testata ja kokeilla, sitä luotettavampi siitä tulee ja mahdolliset virheet suunnittelussa ja toteu-

tuksessa tulevat esiin. Myös näiden mahdollisten virheiden korjaamiseen jää paremmin aikaa. Menestys ei kuitenkaan ole kaikki kaikessa, vaan oppiminen on ehkä oleellisin, mitä FS-auton tekeminen ja sillä kilpailuihin osallistuminen tarjoavat, riippumatta siitä, onko kyse FSE:stä tai FSC:stä. Sähköautotekniikka on tulevaisuutta ja ehkä jossain määrin nykypäivääkin, mutta polttomoottoritekniikassa on vielä paljon kehitettävää ja mahdollisuuksia. Sama pätee myös Formula Student -kilpailussa, joissa kummatkin tekniikat tarjoavat yhtä lailla haasteita ja menestymisen mahdollisuuksia mutta ennen kaikkea ainutlaatuisen tilaisuuden oppia.



## VIITELUETTELO

- [1] Formula Student - Academy. *2010 FSE-Rules* [verkkodokumentti]. 13.6.2010 [viitattu 23.6.2010]. Saatavissa: [http://www.formulastudentelectric.de/uploads/media/FSE\\_Rules\\_2010\\_v1.5.0.pdf](http://www.formulastudentelectric.de/uploads/media/FSE_Rules_2010_v1.5.0.pdf).
- [2] SAE International. *2010 FSAE-Rules* [verkkodokumentti]. 2009 [viitattu 25.6.2010]. Saatavissa: <http://students.sae.org/competitions/formulaseries/rules/2010fsaerules.pdf>
- [3] Dixon, John C., *Tires, Suspension and Handling*. Warrendale, Pa.: SAE 1996 (1991).
- [4] Larminie James, Lowry John, *Electric Vehicle Technology Explained*. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England: John Wiley & Sons Ltd. 2003.
- [5] Wolf-Heinrich Hucho, *Aerodynamics of Road Vehicles. Fourth Edition*. Warrendale, Pa.:SAE. 1998.
- [6] *Autoteknillinen taskukirja. 6. painos*. Jyväskylä: Autoalan Koulutuskeskus. 2003 (1986).
- [7] Kytö Petri, *Auton dynamiikka*. Autotekniikan opetusmateriaali. Helsingin ammattikorkeakoulu Stadia.
- [8] *Electric Motor* [verkkodokumentti]. 2010 [viitattu 15.9.2010] Saatavissa: <http://www.tutorvista.com/content/science/science-ii/magnetic-effects-electric-current/electric-motor.php>.
- [9] *Sensorless BLDC and 8051-based Microcontroller* [verkkodokumentti]. 29.12.2008 [viitattu 17.9.2010] Saatavissa: <http://bldc.wikidot.com/bldc-and-8051>.
- [10] Sen P.C., *Principles of Electric Machines and Power Electronics*. Ontario, Canada, John Wiley & Sons, Inc. 1997.
- [11] *Reluctance brushless dc motor* [verkkodokumentti]. 2009 [viitattu 20.9.2010] Saatavissa: [http://www.globalspec.com/RefArticleImages/2E7925ABC41B09A0B5EEC3EC31C13BF3\\_9\\_1\\_1\\_9\\_1\\_1-IMGS-18.jpg](http://www.globalspec.com/RefArticleImages/2E7925ABC41B09A0B5EEC3EC31C13BF3_9_1_1_9_1_1-IMGS-18.jpg).
- [12] *Induction motor* [verkkodokumentti]. 26.7.2008 [viitattu 27.9.2010] Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Tiedosto:Induction-motor-3a.gif>.
- [13] Mehrand Ehsani, Ylimi Gao, Ali Emadi, *Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles Fundamentals, Theory and Design*. Second Edition. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group. 2010.
- [14] Virtanen Markus, *Yleisten akkuteknikoiden soveltuvuus sähköautokäyttöön* Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. 2010.

- [15] Hakkarainen Ville, *Ulkoisen potentiaalin vaikutus rajapintojen ilmiöihin*. Oulun yliopisto. [verkkodokumentti] 2009 [viitattu 17.11.2010]. Saatavissa: <http://cc.oulu.fi/~pometwww/477405S/Luento9.pdf>.
- [16] *H Bridge* [verkkodokumentti]. 9.6.2006 [viitattu 12.10.2010]. Saatavissa: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:H\\_bridge.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:H_bridge.svg).

## Endurancen energian kulutuksen MatLab-simulointi

```

v = (Ground_Speed.Value) / 3.6;
%Nopeus km > ms
t = linspace(0,809.5684,414500);
%Ajan määrittely
Fi = zeros(1,414499);
%Ilmanvastuksen taulukko
Ft = zeros(1,414499);
%Kokonaisvastusten taulukko
Fa = zeros(1,414499);
%Kiihdytysvastuksen taulukko
P = zeros(1,414500);
%Hetkellisentehon taulukko
Pt = zeros(1,414500);
%Kokonaistehon taulukko
fv = zeros(1,414499);
%Suodatetunnopeuden taulukko
tacc = linspace(0,809.5664,414499);
acc = zeros(1,414500);
%Kiihtyvyyden taulukko
dT = (809.5684/414500);
%Näytteenottotaajuus

%1:414500 arvot for lausekkeisiin koko kilpailulle
%0 809 arvot kuvaajien aika-akselille yhdelle kierrokselle
%2.8488e+005:3.1386e+005 arvot for lausekkeisiin yhdelle kierrokselle
%556.4 613 arvot kuvaajien aika-akselille yhdelle kierrokselle

o = 2.8488e+005
%For-lausekkeen alkuarvo
g = 3.1386e+005
%For-lausekkeen loppuarvo

Rd = 0.2667;
%Renkaan dynaaminensäde Hoosier 20.5*7.0-13

m = 350;
%massa kg

cw = 0.65;
%Ilmanvastuskerroin
A = 1;
%poikkipinta-ala m^2
p = 1.26;
%Ilmantiheys

fs = 1/dT;
%näytteenottotaajuus
fcut = 5;
%suodattimenraja taajuus
n = 1;
%suodattimen kertaluku

[b,a] = butter(n,fcut/fs,'low');
%suodatin

```

```

fv = filtfilt(b,a,v);
%suodatus

w = (fv/(Rd*2*pi))*2*pi;
%kulmanopeus rad/s

rpm = (fv/(Rd*2*pi))*60;
%pyörintänopeus rpm

vvk = 0.0325;
%vierinvastuskertoimen laskeminen

Fr = vvk*m*9.82;
%Vierinvastuksen laskeminen

for n = 0:g

    Fi(n) = (p/2)*cw*A*(fv(n)^2);

end;
%Ilmanvastuksen laskeminen

    acc = diff(fv)/dT;
    %Kiihtyvyys ms^2

for n = 0:g

    Fa(n) = acc(n)*(m)*1.15;

end;
%Kiihdytysvastuksen laskeminen redusoidulla massalla

    Ft = Fi+Fa+Fr;
    %Kokonaisvastuksen laskeminen, voima pyörällä

M = Ft*Rd;
%Ajovastusten luoma vääntömomentti vetoakselilla

for n = 0:g

    if M(n) > 0
        P(n) = M(n)*w(n);

    else
        P(n) = M(n)*w(n)*0;

    end;

end;

%Hetkellisen tehon laskeminen, jos vääntömomentti vetoakselilla on pie-
nempi kuin nolla niin tehokin on nolla

E = (sum(P)*(dT))/3600000*26
%Koko endurancen energia kilowatteina, tehon "integrointi"
%Viimeistä kerrointa muutettava sen mukaan simuloidaanko yhtä kierrosta
vaiko koko dataa

```

```

MeanP = mean(P)
%Käytettävän tehon keskiarvo
MeanM = mean(M)
%Ajovastusten luoman momentin keskiarvo
MaxP = max(P)
%Huippu teho
MaxM = max(M)
%Huippu ajovastusten luoma momentti

subplot(4,1,1)
plot(tacc,M); axis([556.4 613 -1500 1300]);
xlabel('Aika(sekuntia)');
ylabel('Vääntömomentti(Nm)');
title('Ajovastusten tuottama vääntömomentti vetoakselilla');
%Kuvaaja ajovastusten luomalle momentille ajan funktiona

subplot(4,1,2)
plot(t,P); axis([556.4 613 0 100000]);
xlabel('Aika(sekuntia)');
ylabel('Teho (W)');
title('Hetkellinen teho');
%Kuvaaja teholle ajanfunktiona

subplot(4,1,3)
plot(t,rpm); axis([556.4 613 0 1100]);
xlabel('Aika(sekuntia)');
ylabel('RPM');
title('Vetoakselin kierrosnopeus');
%Kuvaaja renkaan pyörimisnopeudelle ajanfunktiona

subplot(4,1,4)
plot(t,fv); axis([556.4 613 0 30]);
xlabel('Aika(sekuntia)');
ylabel('Nopeus (m/s)');
title('Ajonopeus');
%Kuvaaja suodatetulle nopeudelle ajanfunktiona

```

## Kiihdytyksen MatLab-simulointi

```

t=linspace(0,100,100001);
%nollasta viiteenkymmeneen sekuntia 0.1 sekunnin välein
y=linspace(1,10,300);
%1000 1300 yhden välein, kuvaajan y akseli
d=zeros(1,100001);
%Taulukko kuljetullu matkalle
vel=zeros(1,100001);
%Taulukko ajoille eri momenteilla
h=zeros(1,301);
dT = 0.001;

m = 350;
%massa
cd = 0.65;
%ilmanvastus
Rd = 0.2667;
%Renkaan dynaaminensäde
A = 1;
%Otsapinta-ala
rr = 0.032;
%Vierintävastuskerroin
u = 1;
%voimansiirron hyötysuhde
i = 1;
%välitys

%For-lauseke väännölle
for a = 1:301

    x = a+1000;

    mm = x;
    %For-lauseke kiihdytykselle
    for n = 1:20000
        %Hetkellisen nopeuden laskeminen
        vel(n+1)=vel(n) + dT*(((i/Rd)*u*(mm))- (rr*m*9.8)-
        (0.625*A*(cd*vel(n)^2)))/(m*1.15);
        %Matkan laskeminen
        d(n+1)=d(n) + dT*vel(n);
        %Aika 75 metrissä
        if(d(n)<=75)
            s = n;
        elseif(d(n)>75)
            l = 0;
        end;
    end;
    %Ajat kullekin momentille
    h(a) = s*dT;

end;

%Kuvaaja, momentti kiihdytysajan funktiona
plot(h,y); axis([3.5 4.2 1000 1300]);
xlabel('Aika 75 metriin (s)');
ylabel('Vääntö taka-akselilla (Nm)');
title('');

```

2010 FSE endurancen energiatehokkuuden/kulutuksen tulokset

**Formula Student Germany**  
Results



**FSE Energy Efficiency**

| Car # | University     | Energy [MJ] | endurance time [ss:hh] | Laps | Energy per Lap [MJ] | AVG Laptime [ss:hh] | scor. Laptime [ss:hh] | scor. Energy [MJ] | Efficiency Factor | Scores (max 100) | Placing |
|-------|----------------|-------------|------------------------|------|---------------------|---------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|------------------|---------|
| E14   | Deggendorf UAS | 8,15        | 1041,21                | 15   | 0,54                | 69,41               | 69,41                 | 0,54              | 0,80              | 100,00           | 1       |
| E40   | Eindhoven TU   | 18,81       | 1617,36                | 28   | 0,67                | 57,76               | 57,76                 | 0,67              | 0,78              | 87,87            | 2       |
| E15   | Graz TU        | 17,69       | 1780,25                | 28   | 0,63                | 63,58               | 63,58                 | 0,63              | 0,75              | 73,06            | 3       |
| E13   | Hafslund UH    | 9,23        | 1128,40                | 16   | 0,58                | 70,53               | 70,53                 | 0,58              | 0,74              | 67,46            | 4       |
| E26   | Stuttgart U    | 22,71       | 1554,72                | 28   | 0,81                | 55,53               | 55,53                 | 0,81              | 0,67              | 19,77            | 5       |
| E33   | Zürich ETH     | 11,76       | 780,72                 | 14   | 0,84                | 55,77               | 55,77                 | 0,84              | 0,64              | 0,00             | 6       |
| E11   | Berlin TU      |             |                        |      |                     |                     |                       |                   |                   |                  |         |
| E12   | Köln UAS       |             |                        |      |                     |                     |                       |                   |                   |                  |         |
| E16   | Diepholz UAS   |             |                        |      |                     |                     |                       |                   |                   |                  |         |
| E17   | Karlsruhe KIT  |             |                        |      |                     |                     |                       |                   |                   |                  |         |
| E21   | Aachen RWTH    |             |                        |      |                     |                     |                       |                   |                   |                  |         |
| E22   | München UAS    |             |                        |      |                     |                     |                       |                   |                   |                  |         |
| E62   | Zwickau UAS    |             |                        |      |                     |                     |                       |                   |                   |                  |         |
| E69   | Mosbach DHBV   |             |                        |      |                     |                     |                       |                   |                   |                  |         |
| E90   | Bratislava TU  |             |                        |      |                     |                     |                       |                   |                   |                  |         |

Tmin 55,53 ss:hh  
Tmax 74,02 ss:hh  
Emin 0,54 MJ  
EFmin 0,64  
EFmax 0,80